



**David Cambor
Blasco**

**On the efficiency of different constitutive models
and equations of state when modelling ballistic
impact**



**David Camblor
Blasco**

**On the efficiency of different constitutive models and
equations of state when modelling ballistic impact**

Proyecto presentado en la Universidade de Aveiro para el cumplimiento de los requisitos necesarios para la obtención del grado de Ingeniería Mecánica, realizado con la orientación científica del Doctor Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias, Profesor auxiliar del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidade de Aveiro.

tribunal

presidente

Prof.^a Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Robertt Angelo Fontes Valente
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias
Professor Auxiliar com Agregação da Universidade de Aveiro

agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar al Profesor Doctor Filipe Teixeira-Dias por la confianza depositada en la realización de este trabajo, así como su orientación y conocimientos transmitidos que me han servido de indispensable ayuda.

A la Profesora Doctora Mónica Oliveira Correia por su ayuda en mi adaptación a la Universidade de Aveiro como estudiante de Erasmus.

A la Profesora María Belén Muñoz Abella de la Universidad Carlos III de Madrid, mi tutora para el Erasmus, por su gran ayuda y confianza depositada para que fuera posible mi año de estancia en el extranjero.

A todos mis profesores de la Universidad Carlos III de Madrid por todos los conocimientos transmitidos en estos años de formación.

A mi familia y amigos, por su apoyo incondicional en todos los momentos buenos y malos. En especial a mis padres por su constante ayuda y motivación a conseguir alcanzar mis objetivos.

palabras clave

Sistemas de protección, balística, proyectil, acorazado, penetración, modelo de Johnson-Cook, objetivo, Método de los Elementos Finitos, Abaqus, simulación numérica, impacto, acero.

resumen

En el mundo actual existen numerosas amenazas que hacen necesaria la constante evolución de los sistemas de protección. La simulación de impacto de proyectiles mediante el Método de los Elementos Finitos es uno de los ensayos más comunes y con más futuro dada su rapidez de cálculo, realismo y, sobre todo, su bajo coste respecto a los ensayos del tipo experimental (de carácter destructivo). En este trabajo se pretende llevar a cabo un estudio del arte y posteriormente aplicarlo a un caso real en el que un proyectil esférico impacta contra el doble casco de un buque acorazado de 500 toneladas. El análisis se realizará sobre el impacto contra el primer casco y, a continuación, contra el doble casco del navío. Además, para dos velocidades de impacto diferentes, evaluando posteriormente si existe perforación parcial o completa del acorazado.

El análisis se caracteriza siguiendo el modelo de daño y de plasticidad de Johnson-Cook, siendo escogido como material el acero Weldox 460 E dada su similitud con los aceros utilizados en aplicaciones navales. El software utilizado para este trabajo será el Abaqus/ExplicitTM.

Se puede observar en los resultados como el modelo de fallo depende totalmente de la velocidad del impacto, al tener en este trabajo un sólo tipo de proyectil (hemisférico). La velocidad residual del proyectil después del impacto, así como su variación de energía cinética variarán dependiendo de la velocidad del impacto así como del espesor del objetivo.

keywords

Protection systems, ballistics, projectile, battleship, penetration, Jonhson-Cook model, target, Finite Element Method, Abaqus, numerical simulation, impact, steel.

abstract

Nowadays many threats require the constant development of protection systems. Ballistic impact simulation using the Finite Element Method is one of the most common and feasible tests due to their velocity of calculation, realism, and especially their low cost compared to experimental testing (destructive character).

This project aims to conduct a study of the current state of the art and application of the finite element method to a real case in which a spherical projectile impacts a hull and bulkhead of a 500 tons battleship. Many different cases have been studied using different initial velocities. The analyses have been modelled using the Jonhson-Cook plasticity and failure models. The material chosen for this project was the Weldox 460 E steel because of its similarity to marine applications steels. The software used is Abaqus/ExplicitTM. It can be seen on the results how damage and failure highly depend on the impact velocity. The residual velocity after the impact and the kinetic energy loss will vary depending on the impact velocity and the target thickness and configuration.

Contenido

1. Introducción	3
1.1 Encuadramiento y objetivos del trabajo	3
1.2 Estado del arte	5
1.2.1 Métodos empíricos	6
1.2.2 Métodos analíticos	8
1.2.3 Métodos numéricos	11
1.2.4. Códigos comerciales de elementos finitos	12
1.3 Introducción a la balística	13
1.3.1 Tipos de balística	13
1.3.2 Tipos de proyectiles	17
1.4 Sistemas de defensa	18
1.5 Introducción a los impactos sobre acorazados	20
1.5.1 Tipos de ataques	21
1.5.2 Hundimiento de un acorazado	22
2. Descripción y comportamiento del material	24
2.1 Descripción del material – Acero Weldox 460 E	24
2.2 Modelo constitutivo	26
2.2.1 Definición del comportamiento termoviscoplastico del material	26
2.2.2 Modelo de fallo de Johnson-Cook	26
3. Modelación numérica	28
3.1 Introducción a la simulación por el Método de Elementos Finitos	28
3.2 Programa de simulación numérica: Abaqus	30
3.3 Descripción de los ensayos realizados	31

4. Resultados	39
4.1. Sumario de los resultados obtenidos	39
4.2 Modos de fallo.....	40
4.3 Velocidad residual	45
4.4 Energía cinética	47
4.5 Conclusiones obtenidas.....	50
4.5.1 Conclusiones generales	50
4.5.2 Trabajos futuros	51
Referencias	52

Capítulo I

Introducción

1.1 Encuadramiento y objetivos del trabajo

Algunos recientes incidentes de gran violencia como los ataques terroristas del World Trade Center en Nueva York, así como los trenes de Atocha en Madrid, o el metro de Londres; han hecho que se eleven las medidas para controlar la seguridad pública. Los gobiernos cada vez invierten más dinero en empresas privadas que sean capaces de garantizar la seguridad de sus ciudadanos. Ya sea bien en personas, vehículos, infraestructuras o cualquier otro tipo de sistema.

La colisión entre dos cuerpos puede ser estudiada desde el caso de seres vivos, hasta cualquier aplicación estructural dentro de la industria, como la aviación comercial, la aviación militar, las infraestructuras marinas, las instalaciones nucleares, etc.

Los impactos a alta velocidad han sido uno de los campos más estudiados durante los últimos 50 años, dada su gran importancia y dificultad de evaluación, ya que durante este tipo de ensayos, los materiales se ven sometidos a un elevado gradiente de temperatura asociados al impacto y altas deformaciones que alteran el comportamiento teórico de la tensión y la ductilidad de los materiales empleados.

En el caso de la industria naval, el diseño de los acorazados evolucionó para estar siempre en vanguardia con la incorporación y la adaptación de los avances tecnológicos. El término «acorazado» comenzó a usarse en la década de 1880 para definir un tipo de buque de guerra

blindado con placas metálicas, los ironclad, que hoy son conocidos por los historiadores navales como acorazados «pre-dreadnought».

La valía de los acorazados ha sido cuestionada, incluso en su período de apogeo. A pesar de los inmensos recursos empleados en la creación de acorazados y de su enorme potencia de fuego y blindaje, hubo muy pocos enfrentamientos entre ellos y demostraron ser cada vez más vulnerables a naves y armas más pequeñas y baratas: primero los torpedos y las minas marinas, y después los aviones y misiles guiados. La creciente distancia de los enfrentamientos navales llevó a que los portaaviones remplazaran a los acorazados como buques principales de combate durante la Segunda Guerra Mundial.

Durante el desarrollo de acorazados o barcos blindados, y antes de su producción, cuyo proceso es de un elevadísimo coste económico y tiempo de desarrollo. Son de muchísima utilidad e importancia las simulaciones previas mediante software de elementos finitos (como el Abaqus CAE que será utilizado en este proyecto). Una aproximación al funcionamiento computacional en balística es lo mostrado en la figura 1.1 y el cual está basado en la literatura que explicaremos más adelante en los capítulos posteriores. [3]

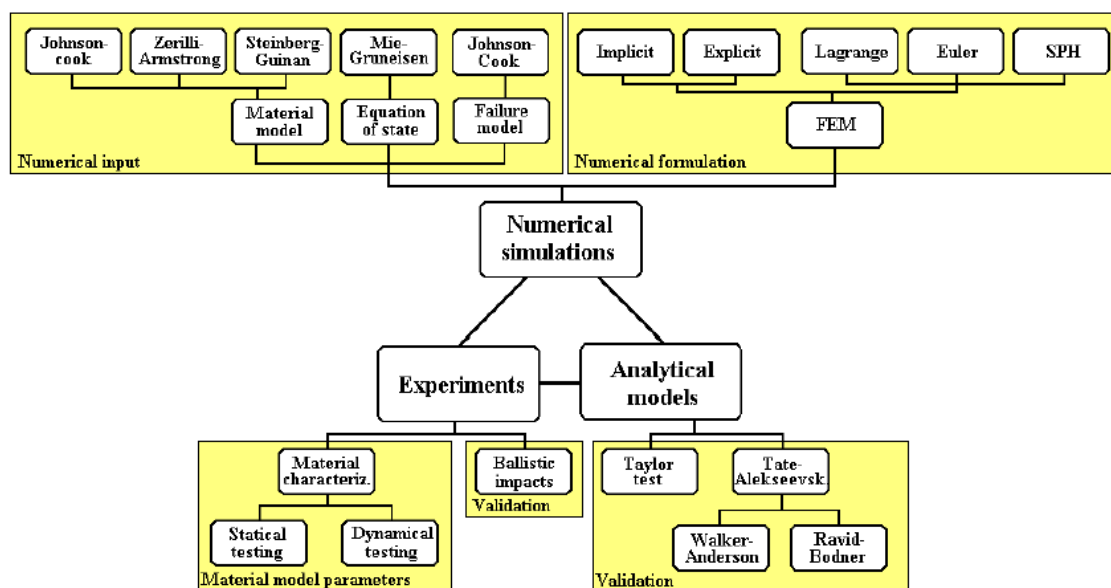


Figura 1.1 Organigrama para el campo de la balística.

Con este contexto, el presente trabajo tiene por objetivo el estudio de la capacidad de defensa de un acorazado de 500 toneladas cuyo doble casco está fabricado de acero. Todo ello mediante el Método de los Elementos Finitos con fin el evaluar la amenaza de algunos parámetros que amenazan la protección de este tipo de navíos. De una forma genérica, a continuación se describen los objetivos principales de este proyecto:

- Realizar un estudio teórico del estado del arte en el campo de la balística en general con el que obtener los conocimientos necesarios para la realización de este proyecto.

- Definir correctamente las diferentes partes que componen la simulación de un ensayo de balística mediante el Método de los Elementos Finitos utilizando el software comercial Abaqus.
- Estudiar los modos de fallo de un proyectil que impacta en el casco del acorazado para el caso de un solo casco, y del doble casco.
- Analizar la influencia de la velocidad de impacto en la perforación del proyectil en el acorazado y estudiar sus velocidades residuales a la salida de cada impacto.
- Estudiar la cantidad de energía cinética que se disipa en cada impacto que es absorbida por cada placa de acero.

1.2 Estado del arte

Un estudio teórico fue llevado a cabo para obtener todos los conocimientos necesarios en el campo de la balística y las investigaciones que se estaban realizando en él. Las diferentes partes del organigrama incluido en el apartado anterior serán consideradas en las siguientes secciones.

La balística se define como la ciencia que estudia una gran variedad de fenómenos que ocurren desde el momento en el que un objeto o proyectil es lanzado hasta que sus efectos se observan en el objetivo. La balística en general puede dividirse en diferentes sub campos y está presente en un gran número de sectores de la industria actual. Para demostrar la grandeza de su área de aplicación, a continuación se realizará un sumario de los sectores más importantes:

- Laboratorios e institutos de investigación (*e.g.* TNO); impactos de alta velocidad ($50 < v < 1500$ m/s). Por ejemplo, modelos analíticos, medición de grandes deformaciones o impacto de proyectiles.
- Astronomía y aeronáutica (*e.g.* NASA, ESA); impactos de hiper velocidad ($v > 1500$ m/s). Por ejemplo el impacto de los meteoritos contra los satélites.
- Industria de la automoción (*e.g.* BMW, Ferrari); impactos de baja/moderada velocidad ($v < 50$ m/s). Un ejemplo serían las colisiones entre vehículos.
- Industria de la aviación (*e.g.* Boeing, Airbus); impactos de alta velocidad.
- Barcos militares; impactos de alta velocidad.
- Industria del software (*e.g.* MSC-Software, Autodyn, Abaqus, Ls-Dyna); impactos de baja/moderada/alta/hiper velocidad como las simulaciones balísticas.

Todos los sectores tienen sus propios intereses en la balística y los ejemplos muestran su gran campo de aplicación e incidencia. Puede verse así que resulta imposible obtener un resultado o método global para analizar un impacto; cada caso puede tener diferentes tipos de condiciones de contorno, tipos de proyectiles, y diferentes materiales.

Cuando tiene lugar un impacto entre un proyectil y su objetivo ocurre una transferencia de energía cinética del proyectil al objetivo, siendo un proceso de elevada complejidad. El comportamiento del impacto va a cambiar dependiendo de diversos factores como las propiedades del proyectil, la trayectoria, la diferencia de masa entre objetivo y proyectil, la velocidad del impacto, la forma de la punta del proyectil, el grosor del objetivo o las condiciones de soporte del objetivo.

Sin embargo, el factor más importante de los anteriormente citados es la velocidad del proyectil. Así, dependiendo de las diferentes velocidades de impacto, podremos diferenciar entre los distintos regímenes de impacto.

La mayoría de los autores estudiarán los impactos sobre objetivos metálicos dependiendo de la velocidad del impacto. Johnson [1] por ejemplo estableció que una forma muy útil de estudiar el comportamiento de los metales en los impactos, es el parámetro adimensional $\rho v^2/Y$; siendo v la velocidad relativa del impacto, ρ la densidad del material, e Y la tensión a cedencia media. Este parámetro el autor lo denominó “número de daño” (damage number). El término ρv^2 representa la tensión a cedencia dinámica, la cual ocurre en la superficie entre el proyectil y el objetivo durante el proceso de penetración; Y representa la tensión a partir de la cual el proyectil fluye a través del material. El mayor problema que tiene este parámetro adimensional es la falta de diferenciación entre el material del proyectil y el del objetivo. Jonas y Zukas [2] conseguirán reproducir los diferentes comportamientos de los materiales del objetivo y el proyectil para una amplia gama de velocidades de impacto.

1.2.1 Métodos empíricos

Los experimentos balísticos son cruciales en la investigación y los problemas asociados a la mecánica de armamento, tanto en sus aplicaciones como en su diseño. Para dar validez a las simulaciones numéricas, siempre es necesario contrastar con experimentos reales, a pesar de su elevado coste. Debido a las elevadas velocidades con las que se trabajan, una minuciosa verificación de la instrumentación que se va a utilizar es siempre necesaria. A lo largo de esta sección se hará un breve sumario de diferentes contribuyentes a estos experimentos, y sus métodos propuestos.

A menudo, es necesaria una autorización del gobierno para realizar este tipo de ensayos, dada la peligrosidad de los mismos. Muchas veces es necesario utilizar un disparador universal, con unas posiciones predefinidas para el objetivo como puede observarse en la figura 1.2.



Figura 1.2 Escenarios para diferentes experimentos de impacto balístico.

Los diferentes dispositivos de medición son situados alrededor del objetivo para obtener los datos deseados. Normalmente, la profundidad de la penetración del proyectil es uno de los datos que se utilizan para relacionar los experimentos con los resultados de las simulaciones numéricas.

Wilkins (1978) [5] estableció los primeros límites de velocidad V_m para objetivos hechos de acero con ángulo de incidencia igual a cero. En 1980 se estimó el límite de velocidad que podían alcanzar los fragmentos compactos que golpeaban un objetivo fabricado de acero medio, y además, Baker y Williams [6] fueron capaces de obtener la velocidad residual que llevaba el proyectil tras la perforación y lo escribieron en el libro *"A manual for the prediction of blast and fragment loading loadings on structures"* que fue publicado en 1987.

En 1989, Wilson [7] presentó un estudio experimental con los resultados de diferentes impactos sobre 2024 objetivos diferentes hechos de aluminio y con explicaciones sobre la profundidad del agujero.

En 1992, Dikshit y Sundararajan [8] estudiaron la penetración de gruesas chapas de acero mediante proyectiles de sección ovalada. Para ello usaron placas de armamento homogéneas (RHA) con espesores de 20, 40, y 80 mm para los objetivos. La dureza de las placas (BHN) era de 320, 300 y 290 respectivamente, y todo fue experimentalmente medido para un rango de velocidades de entre 300 y 800 m/s.

Trucano y Grady [9] en 1995 describieron una técnica experimental y presentaron los resultados obtenidos después de una serie de ensayos usando esferas de cobre, que viajaban a una velocidad de entre 2000 y 4000 m/s, las cuales impactaban en unos objetivos de espuma de hidrocarburo con una densidad de 176 kg/m³.

Piekutowski [10] en 1999 desarrolló una serie de experimentos de profundidad de penetración usando proyectiles ovalados de 71.12 mm de largo y 7.11 mm de diámetro. Los objetivos eran de aluminio 6061-T6511 de 254 mm de diámetro con velocidades de impacto entre 500 y

3000 m/s. Se encontraron muchas buenas relaciones entre los datos de la penetración de los proyectiles y la expansión de las cavidades.

El almirante Borvik [11] en 1999 estudió la penetración balística sobre placas de acero y presentó un programa de investigación en progreso, cuyo principal objetivo era estudiar el comportamiento de las placas de acero 460E cuando eran impactadas por proyectiles de punta plana y de cuerpo cilíndrico en regímenes de velocidades bajos. Usaba un sistema de cámara que combinaba las ventajas de una cámara con convertidor de imagen y de una cámara CCD. La primera mostraba unos disparos muy rápidos y consecutivos, mientras que la cámara CCD mostraba imágenes digitales. Para obtener unos resultados en 3-D de la penetración, se situaban espejos por encima de la trayectoria del proyectil con un ángulo de 45 grados. Las ventajas de este sistema es que los impactos y sus fenómenos físicos podían ser estudiados en el momento. Para medir las velocidades, Borvik [11] usaba un sistema de fotocélula con dos barreras iguales de luz con luces LED en la parte superior de la trayectoria del proyectil, y detectores en la parte inferior. Cuando el proyectil pasaba a través de la luz, las señales era interrumpidas y enviadas a un contador de nanosegundos. De los datos recogidos, se calculaban las velocidades. En la superficie del objetivo, se empleaban seis luces láser para medir la velocidad residual del proyectil.

En el año 2000, Yarin [12] describió la fractura de objetivos y proyectiles durante penetraciones de incidencia normal (ángulo de incidencia igual a cero) empleando un modelo de desintegración modificando la teoría caótica de desintegración de los líquidos.

1.2.2 Métodos analíticos

Los modelos analíticos han sido desarrollados para predecir varios parámetros tales como la profundidad de la penetración en el objetivo, la longitud del proyectil después del impacto, su pérdida de velocidad y energía cinética, y muchos más. Estos parámetros son normalmente obtenidos a través de otros modelos más simplificados. A continuación se realizará un breve sumario de los modelos más importantes.

En 1955, Thompson [13] desarrolló una teoría aproximada de la penetración “quasi-dinámica” usando proyectiles de cabeza cónica y ovalada sobre placas de reducido espesor. Zaid y Paul [14], en el año 1959 estudiaron la perforación con trayectoria oblicua sobre placas finas mediante un proyectil truncado con cabeza cónica, el cual era disparado a alta velocidad. Awerbuch [15] presentó en 1970 un modelo matemático el cual describía la forma en la que era perforadas placas metálicas con un impacto con incidencia normal al plano. Wilkins [16] 8 años más tarde estudió desde el punto de vista mecánico, la penetración y perforación, e identificó la importancia e influencia del material escogido y sus parámetros, tanto de los proyectiles como de los objetivos. El almirante Jones en 1980 estudió los cálculos balísticos de R.W. Gurney y revisó su método original para estimar la velocidad terminal de los fragmentos acelerados mediante una explosión con elementos simétricos. En 1991, Luk y Piekutowski [17] desarrollaron un modelo analítico para predecir el comportamiento de la erosión en largas barras que penetraban objetivos metálicos con un ángulo normal al plano; sus velocidades de impacto eran superiores a 2000 m/s. En los siguientes años, numerosos autores estudiaron también el impacto de proyectiles, pero con menos relevancia dada la disposición de los

métodos actuales, lo que hace que el trabajo resulte bastante más sencillo. A continuación se mostrará con más detalle algunos de los modelos de mayor relevancia.

Modelo de Alekseevskii-Tate

Alekseevskii y Tate [18] desarrollaron independientemente el mismo modelo basado en un objetivo semi-infinito que era penetrado por una vara de acero. Para ello empleaban un balance energía utilizando la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{1}{2}\rho_p(v_{p,rear} - v_{p,pen})^2 = \frac{1}{2}\rho_t v_{p,pen}^2 \quad (1.1)$$

En esta ecuación, ρ_p y ρ_t son las densidades del proyectil y del objetivo (*target*) respectivamente, $v_{p,rear}$ es la velocidad del proyectil, y $v_{p,pen}$ es la velocidad de penetración. Los experimentos de Alekseevskii y Tate revelaron que la velocidad de penetración es mucho más pequeña de lo que muestra la ecuación 1.1. La explicación se encuentra en el carácter hidrodinámico de la ecuación de Bernoulli. Alekseevskii y Tate asumieron que el material actuaba como un cuerpo rígido hasta una cierta presión, Y_p . Por encima de esta presión, el material se comporta de manera hidrodinámica. Así, la ecuación 1.1 queda modificada de la siguiente manera:

$$\frac{1}{2}\rho_p(v_{p,rear} - v_{p,pen})^2 + Y_p = \frac{1}{2}\rho_t v_{p,pen}^2 + R_t \quad (1.2)$$

Donde Y_p es usualmente llamado la rigidez o fuerza del proyectil, y R_t es la resistencia del objetivo. Se pueden dar dos casos, el primero en el que $Y_p < R_t$ donde bajo una cierta velocidad de penetración ya no sucede ningún cambio. Y el segundo caso, donde $Y_p > R_t$, donde bajo una cierta velocidad, el proyectil se perfecta como un cuerpo rígido. Algunas de las formulaciones para la resistencia del objetivo y R_t son mostradas en [19].

Modelo de Walker-Anderson

Walker y Anderson del Instituto de investigación del sur oeste (SWRI¹) revisaron el modelo de Alekseevskii y Tate. Lo compararon con simulaciones numéricas y mostraron como el comportamiento transitorio al inicio, y cerca del final de la penetración no estaba correctamente descrito [20]. Además, la componente z de la ecuación del momento de Euler fue examinada. Para simplificar la ecuación del momento se asumieron tres conceptos basados en los resultados numéricos [20].

- El perfil de velocidades es tomado a lo largo de la línea central en la dirección axial ($u_x = u_y = 0$);

¹ Del inglés: *Southwest Research Institute*.

- La parte trasera del proyectil era frenada por ondas elásticas y las superficies libres tenían $\sigma_{zz} = 0$;
- El comportamiento cortante se especifica en el material del objetivo asumiendo que el flujo del campo es monóticamente decreciente y tiene un comportamiento hemisférico.

Modelo de Ravid-Bodner

Ravid y Bodner [21] asumieron flujos de campo para las diferentes regiones durante el impacto, como puede verse en la figura 1.3b. Se utiliza un procedimiento para determinar la deformación plástica sufrida tanto en la dirección longitudinal, como en la dirección radial (combinada con condiciones entre las diferentes zonas de flujo). Asumiendo flujos de plasticidad en dos dimensiones tanto en el penetrador como en el objetivo, las fracciones de trabajo pueden ser calculadas y el balance de la fracción de trabajo total puede ser establecido. Definiendo de una manera correcta las condiciones de contorno para las diferentes regiones, se pueden obtener el resto de incógnitas en el balance de trabajo. Así, se puede reducir el balance del trabajo total a tres incógnitas llamados velocidad entre superficies, velocidad de la sección sin deformar del proyectil, y el radio del cráter o agujero. En [22] se muestran una gran cantidad de modos de éxito/fallo definidos por Ravid y Bodner utilizables para objetivos metálicos de espesor finito. Estos modos describen también la forma final de la penetración.

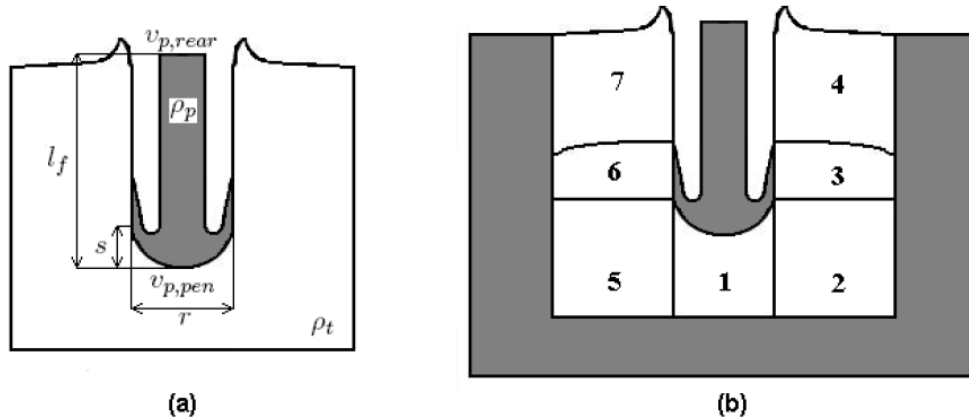


Figura 1.3 a. Variables del modelo de Walker-Anderson b. Flujo de las regiones del campo en el modelo de Ravid-Bodner

Modelo de Taylor

En 1946, Taylor [23] desarrolló un método que determinaba la tensión límite elástica dinámica mediante una medición de la longitud inicial l_0 , y la longitud deformada l_f , después del experimento como puede verse en la figura 1.4. En el experimento, una barra cilíndrica se dispara a través de una pared rígida. Después de la deformación, la barra cilíndrica adquiere una forma similar a la de un champiñón debido a la deformación plástica sufrida. Taylor obtuvo una simple ecuación relacionando la longitud inicial y final, con la tensión límite elástica, la densidad, y la velocidad.

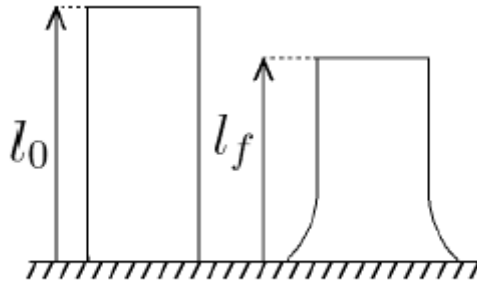


Figura 1.4 Test de Taylor

1.2.3 Métodos numéricos

Cuando se habla de métodos numéricos, estamos hablando de métodos de una magnitud superior a los demás; se requiere una descripción mucho más detallada del comportamiento constitutivo del material, de su comportamiento dependiendo del rango de deformaciones en el que se esté estudiando. Y todo ello con una extensa caracterización. Cuanto más completa y detallada sea la descripción del comportamiento del material, más reales serán los resultados de la simulación. Pero también, mayor será el tiempo de la simulación, más complejo, y por lo tanto, más caro de realizar. Las técnicas de discretización que más se utilizan actualmente son las de diferencias finitas o elementos finitos. Básicamente se pueden clasificar en dos partes dependiendo del tipo de código que se utilice para computarlas: Códigos lagrangianos y códigos eulerianos

Códigos lagrangianos

La formulación lagrangiana es la más común cuando se trata de cálculos de elementos finitos para aplicaciones de ingeniería. Esta formulación define que los puntos o nodos de la maya sobre un cuerpo rígido son únicos [24]. Los elementos son creando uniendo los nodos. Cuando un cuerpo sufre una deformación, los nodos sufren un desplazamiento y así el elemento se distorsiona.

Cuando existen grandes deformaciones en la malla (unos nodos atraviesan a otros) es de gran dificultad de resolver con un código clásico del tipo lagrangiano y se dan problemas en la penetración. Es necesario rehacer la malla para obtener un mínimo nivel de fiabilidad. Así, los elementos distorsionados, son eliminados para permitir que los cálculos continúen, lo cual carece de fundamento físico. La gran ventaja de este método es la gran precisión con la que se pueden describir pequeñas deformaciones o desplazamientos del material.

Códigos eulerianos

La formulación euleriana se utiliza más frecuentemente para el análisis de fluidos o materiales que se ven sometidos a grandes deformaciones. Los ensayos de armamento y balística sufren unas grandes deformaciones y pueden llegar a alcanzar el punto de fusión del material por lo que este tipo de códigos suelen ser adecuados.

En una formulación euleriana, los puntos de la malla están fijados en el espacio y los elementos son creados uniendo estos puntos. Una malla euleriana es digamos un marco fijado de referencia en el cual el material se mueve de un elemento a otro, y con él su masa, momento y energía. Las mallas de este tipo deben ser lo suficientemente grandes como para que exista el modelo, y superficie para que fluya el material.

Pareja Arbitraria Euler-Lagrange (formulación ALE²)

Esta formulación es una combinación de las dos descritas anteriormente. Permite a los elementos eulerianos fluir y moverse a través de la malla y la vez coincidir con los elementos de la superficie de la malla lagrangiana. Esta superficie puede explicarse como una condición de contorno para la malla euleriana.

Partículas Suaves Hidrodinámicas (SPH³)

SPH es una técnica de mallado libre la cual puede ser aplicada para problemas no lineales sujetos a grandes deformaciones. En [25] se muestra como el código SPH soluciona las desventajas del euleriano y el lagrangiano. En la formulación SPH los puntos tienen libertad de movimiento, con una masa fijada previamente, estos son denominados partículas, y tienen relación mediante una función de interpolación. Una estimación mediante un *kernel* permite describir la conservación de la masa, momento y energía en términos de suma de varias interpolaciones. La desventaja de este tipo de código es la elevada velocidad de oscilación entre las partículas simples.

1.2.4. Códigos comerciales de elementos finitos

Existe una gran variedad de códigos de elementos finitos utilizados comercialmente, en los siguientes párrafos se hará un breve sumario con los códigos utilizados en el campo de la balística computacional.

Rosenberg [26] utilizó un procesador de tipo Euler del código PISCES 2-D ELK (actualmente integrado dentro de MSC software) para simular impactos sobre materiales frágiles. Un mallado del tipo lagrangiano era añadido a la superficie exterior del objetivo para asegurar el comportamiento semi-infinito del mismo.

En [27, 28, 29] se examina la penetración y perforación de barras en objetivos de acero, para problemas de dos dimensiones con simetría cilíndrica y también para problemas en tres dimensiones. Todos estos autores emplearon el código euleriano de onda CTH para sus simulaciones numéricas. CTH emplea un algoritmo “van Leer” con una precisión de segundo orden que ha sido generalizada para elementos no uniformes y de mallado finito. Todas las simulaciones numéricas mostraron buenas relaciones con los resultados obtenidos experimentalmente.

² Del inglés: *Arbitrary Lagrange Euler Coupling*

³ Del inglés: *Smooth Particle Hydrodynamics*

En [11, 30,31] se utiliza el código no lineal, explícito y en tres dimensiones LS-Dyna 3D para simular el impacto en diferentes tipos de armamento. Se estableció una cooperación entre MSC Software y LS-Dyna para aumentar su cuota de mercado.

Autodyn es una rama de Ansys especializada en el desarrollo de software para la sociedad de balística de los Estados Unidos. En asociación con el Departamento de Defensa, Thalys, TNO-PML de Holanda y otras compañías del extranjero. Así, se hacen posible la implementación de estos códigos en Autodyn, y la posible interacción entre ellos.

El código de elementos finitos MSC Dytran es un tipo de formulación no lineal y dinámica. Está formado por un conjunto de formulaciones eulerianas y lagrangianas y es comúnmente utilizado para simulaciones de choques y simulaciones de balística, estas últimas son realizadas mediante códigos Euler debido a las grandes deformaciones existentes y el aplanamiento de los proyectiles.

1.3 Introducción a la balística

La balística es la ciencia que estudia la propulsión, el movimiento y el impacto de los cuerpos lanzados al aire libre. Esta ciencia aparece asociada al disparo de proyectiles a través de armas de fuego. Para analizar correctamente esta ciencia es necesario recurrir a conocimientos tanto físicos como químicos.

El movimiento balístico desde un punto de vista bidimensional puede verse como la descomposición de varios movimientos. En el primer análisis, el del movimiento vertical, el cuerpo está sometido a un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, como consecuencia de la actuación de la fuerza de la gravedad. En el movimiento horizontal, el proyectil experimenta un desplazamiento uniforme, ya que no existe ninguna aceleración en esta dirección.

En los últimos años, el gran éxito que ha tenido la balística se debe a la posibilidad de realizar fotografías a altas velocidades y con estroboscopio. Esto ha permitido profundizar en gran medida en el estudio del movimiento de los proyectiles.

1.3.1 Tipos de balística

La balística puede ser subdividida en tres componentes distintas. (1) La balística interna o interior, (2) la balística externa o exterior, y (3) la balística terminal.

La balística interior

Estudia los procesos que ocurren en el interior del tubo del cañón y la influencia de factores como el diseño del propulsante, la transmisión del calor hacia las paredes de la caña, o el desgaste de la superficie del ánima entre otros. El cañón es el mecanismo encargado de convertir el calor liberado por el propulsante al quemarse en la energía cinética que empuja al proyectil. Con un cañón se pretende lanzar un proyectil a la máxima velocidad inicial y con la menor perturbación posible en el tramo inicial de su trayectoria, contra un blanco situado a una distancia determinada, en condiciones de absoluta seguridad para el personal y los

equipos situados en las proximidades. En la figura 1.5 se pueden observar las diferentes partes de un cañón.

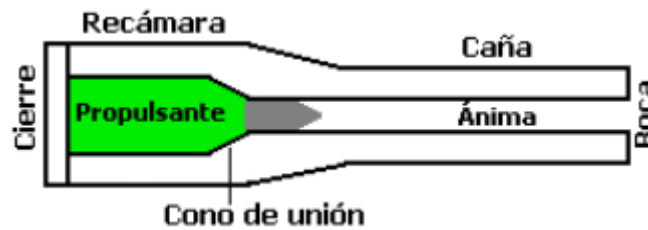


Figura 1.5 Esquema de un cañón.

La balística intermedia

También llamada balística de transición se ocupa de estudiar lo que sucede en las proximidades del cañón, fuera del tubo, hasta que el proyectil deja de ser impulsado por los gases de combustión.

A continuación se desarrollarán brevemente algunos conceptos necesarios para comprender la balística intermedia, y la balística terminal, que se explicará a continuación.

Número de Mach. Onda de Choque

Se define el número de Mach⁴, M , como el cociente entre la velocidad de perturbación y la velocidad a la que viaja el sonido en el medio, c :

$$M = \frac{v}{c}$$

Podemos clasificar los diferentes tipos de perturbaciones en subsónicas, sónicas, transónicas, supersónicas e hipersónicas dependiendo de su número de Mach, en la figura 1.6 se puede observar esa clasificación [32].

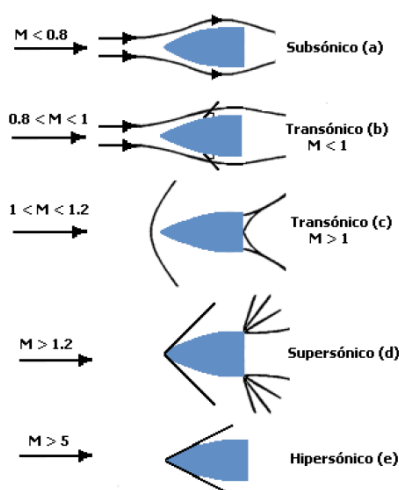


Figura 1.6 Distintos tipos de flujo.

⁴ En honor al físico y filósofo austríaco Ernst Mach (1838-1916).

Flujo del gas cerca de la boca

Cuando el gas propulsante sale por la boca, a alta presión y temperatura, tienen lugar las ondas de presión, las cuales al propagarse a velocidades superiores a la del sonido se convierten en ondas de choque. En las proximidades a la boca del cañón durante el disparo, se produce una variación de la temperatura del gas, y como consecuencia, de la velocidad del sonido. Como los gases tienen una densidad superior a la del aire, su velocidad de propagación en este medio será mayor a la que correspondería en el aire puro.

Flujo del gas a través de la boca

La salida del gas durante un disparo se produce dos fases: Primero se produce una onda de choque primaria, que precede a la salida del proyectil por la boca, y después se crea una onda de choque principal, que se origina cuando el proyectil abandona el ánima y el gas sale por la boca.

Fogonazo

El fogonazo es la luz emitida en las proximidades de la boca por el gas propulsante caliente y las reacciones químicas que se producen al mezclarse este gas con el aire que le rodea.

Estampido

Es la onda sonora escuchada durante el disparo. Cerca del cañón, esta sacudida tiene la intensidad suficiente como para dañar los oídos, y en casos extremos, los pulmones y otros tejidos blandos. También supone una gran indiscreción ante el enemigo. La intensidad del estampido se mide en decibelios (dB).

Se generan dos tipos de estampidos durante un disparo: La sacudida de la onda de choque provocada por la salida del gas propulsante a alta presión a la atmósfera; y la que tiene lugar durante el fogonazo secundario, debido al rápido calentamiento y posterior expansión del gas. Esta última es más frecuente en cañones de gran calibre, y puede suponer más de la mitad de la potencia del ruido del disparo. Ambas sacudidas provocan un aumento de la presión del gas y del aire en las proximidades de la boca.

En la figura 1.7 se puede observar la onda de choque circular, con su correspondiente fogonazo, generada al disparar los 9 cañones de 404 mm de diámetro montados sobre el acorazado norteamericano USS Iowa.



Figura 1.7 USS Iowa disparando sus cañones [33].

La balística terminal

También conocida como balística de los efectos, se ocupa del estudio de los efectos que las municiones producen sobre los blancos [34].

Una de las clasificaciones más comunes para los blancos es aquella que los agrupa según su espesor. Los cuatro tipos son semi-infinitos, gruesos, intermedios y delgados.

Un blanco es semi-infinito si la cara opuesta a la del impacto no ejerce ningún efecto en el proceso de la penetración. En un blanco grueso la cara opuesta influye en la penetración después de que el proyectil recorra un camino considerable dentro del blanco. Si el blanco es intermedio dicha cara ejerce influencia durante toda la penetración, mientras que en un blanco delgado las tensiones y deformaciones producidas en él son despreciables.

La penetración es el recorrido de un proyectil o fragmento en el interior de un blanco sin atravesarlo completamente, mientras que la perforación implica atravesarlo de lado a lado.

Una de las características más importantes a la hora de estudiar como impacta un proyectil con el blanco es la forma del penetrador. Los penetradores puntiagudos concentran su efecto alrededor del eje del proyectil. Con las formas planas sin embargo aparecerán perforaciones por cizallamiento como se puede observar en la figura 1.8 (d). La determinación entre si es de forma puntiaguda, o plana; se puede cuantificar mediante una relación *longitud de la punta/calibre*: si es menor que 1, el penetrador será de tipo plano; en caso contrario, será de tipo puntiagudo.

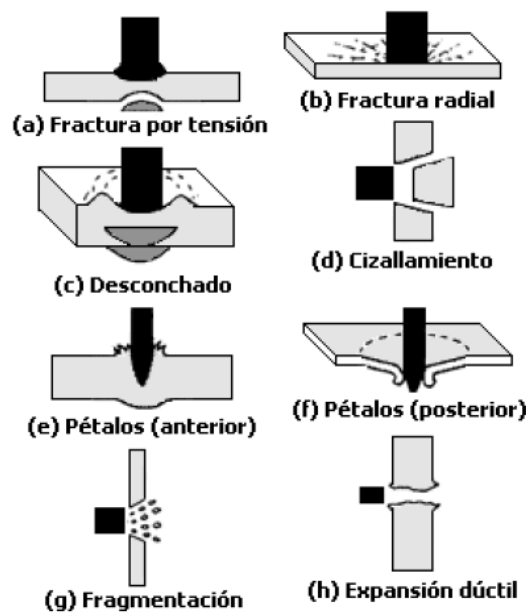


Figura 1.8 Tipos de perforaciones.

Para optimizar el proceso de penetración es importante que el proyectil sea largo y con la mayor densidad posible. En contra, con el aumento de la longitud también aumenta la probabilidad de ruptura por flexión, y también se reducirá su estabilidad en vuelo, a no ser que dotemos al proyectil de aletas. El aumento de densidad llevará además a un aumento de peso por unidad de volumen, lo que modificará la Balística interior empeorando su velocidad inicial. Otro factor a tener en cuenta es que al sufrir el impacto con su consecuente deformación, el proyectil aumenta su diámetro, y con ello disminuye su capacidad de penetración. Así, los penetradores deberían ser indeformables. Como esto es imposible, para aproximarse se suelen emplear compuestos de carburo de wolframio y uranio. El uranio tiene la ventaja de ser muy denso, pero se ve limitado a la hora de impactar porque es muy quebradizo. Teniendo esto en cuenta, el material más utilizado es el acero, ya que tiene la mejor relación de características entre densidad, dureza, resistencia, y sobre todo, abundancia y precio de compra.

1.3.2 Tipos de proyectiles

De acuerdo con Zukas et al. (1982) [35], el término proyectil se puede ser utilizado para cualquier objeto que pueda ser lanzado. Los proyectiles son normalmente caracterizados como macizos, semi-duros o duros, dependiendo del material que sea utilizado y del grado de deformación que sufren durante el impacto. Los proyectiles macizos sufren una deformación significativa, sin embargo, los proyectiles semi-duros sufren una pequeña deformación, la cual puede ser despreciable en los proyectiles duros. A parte de las características nombradas anteriormente, es usual caracterizar a los proyectiles por su geometría inicial. La figura 1.9 muestra alguna de las formas de punta más comunes entre los proyectiles.

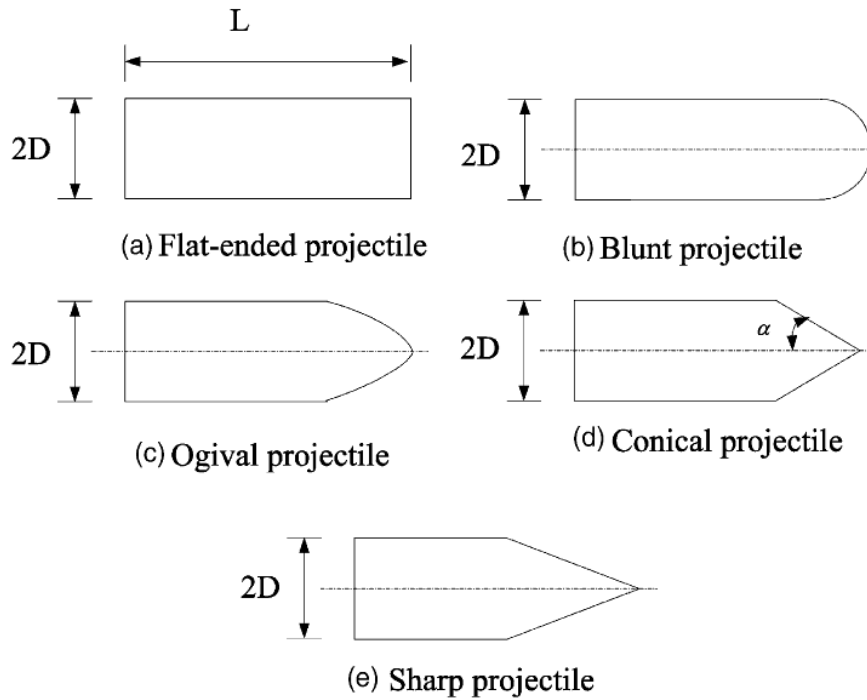


Figura 1.9 Formas genéricas de los proyectiles [36].

1.4 Sistemas de defensa

Para protegerse contra la munición y la metralla se deben emplear materiales ligeros que no limiten la capacidad de movimientos del usuario ni añadan pesos excesivos a los blancos, pero que detengan un disparo a gran velocidad. Para ello, los medios de protección deben resistir la penetración del proyectil y disipar gran parte de su energía cinética. Este objetivo es muy difícil de conseguir con balas a gran velocidad sin emplear equipamientos muy pesados o voluminosos. Además, en el caso de los chalecos antibalas, el sujeto puede recibir gran parte de la energía del impacto a través de la superficie de contacto entre el cuerpo y el chaleco.



Figura 1.10 Primeros chalecos antibalas probados en 1923 [37].

Son muchos los materiales que se emplean para los sistemas de defensa en balística. A continuación se hará un breve sumario de los más utilizados explicando brevemente sus características.

Corazas metálicas

Estas corzas evitan la penetración del proyectil porque normalmente este se destruye durante el impacto. Se suelen instalar en puertas y asientos de helicópteros, vehículos, y otros tipos de transportes blindados. Pueden resistir más de un impacto en la misma zona, pero tienen el inconveniente de que, además de deformarse permanentemente, son muy pesadas y transmiten parte de la energía del impacto a su entorno, en forma de onda de choque. Así, si son empleadas en un chaleco antibalas, tanto la deformación como la onda de choque podrían causar graves lesiones al usuario.

Corazas de material plástico

No son tan eficaces como las metálicas si se pretende una protección válida ante más de un impacto. Para mantener el nivel de protección es preciso reemplazar la zona del impacto. Son así menos pesadas que las metálicas, y especialmente efectivas contra fragmentos y pequeñas partículas que provengan de granadas o minas.

Corazas cerámicas

Los materiales cerámicos se caracterizan por su baja densidad y su dureza. Presentan una resistencia al impacto parecida, o incluso superior a las corazas metálicas, pero las zonas de impacto tienen que reemplazarse después de cada disparo. Esta desventaja el alto coste de fabricación hacen que se empleen salvo en situaciones muy específicas.

Corazas textiles

Están compuestas por densas capas de fibras entrelazadas, generalmente de nylon y kevlar. Son capaces de detener proyectiles porque su punta se deforma al entrar en contacto con la malla de fibras. Son flexibles, relativamente livianas, y se pueden incorporar con prendas de vestir, pero el usuario puede resultar dañado por las propias fibras de la protección, aunque siempre en menor medida que el propio impacto de la bala.

Corazas transparentes

A este grupo pertenecen los cristales y el metacrilato. El cristal es el único antibalas transparente que puede resistir disparos de rifle, pero se necesita emplear varias láminas para atenuar la fragmentación del vidrio y agrupar las esquirlas que se producen durante el impacto. El metacrilato no se fragmenta, pero solo es útil para resistir impactos a baja o moderada velocidad.

Corazas compuestas

Se utilizan para disipar gran cantidad de energía cinética sin transmitirla al objetivo protegido. Están formadas por tres capas, una de metal, otra de cerámica, y la última de material plástico, que combinan las ventajas de cada uno. Tienen el inconveniente de su limitada capacidad de reutilización debido principalmente al deterioro de la cerámica.

1.5 Introducción a los impactos sobre acorazados

El acorazado fue durante casi 100 años el cénit de la potencia mundial. Eran las construcciones más esmeradas. Las naciones como Gran Bretaña, Francia o Alemania medían su poder y prestigio internacional según el número de buques de batalla que poseían. Los acorazados eran el orgullo de las naciones, una auténtica exposición flotante de su poder tecnológico. Sus máquinas eran más potentes que fábricas enteras, sus cañones eran de mayor calibre que ninguno terrestre. Nada en el mundo podía compararse con estas naves. Naves enormes de acero cubiertas de gruesas planchas de blindaje y sin embargo se hundían. En los párrafos siguientes se intentará explicar los principales motivos de hundimiento de los acorazados.

El campo de los impactos balísticos ha sido desarrollado y estudiado por un amplio rango de entidades tanto militares, como espaciales en todo el mundo. Generalmente, la defensa marítima y su evaluación se basan en dos partes: (1) Proyectiles enviados desde el aire, los cuales pueden causar explosión de fragmentos y otros efectos secundarios como fuego, o inundaciones. (2) Proyectiles enviados desde el agua con efectos como destrucción del casco,

inundaciones, y otros muchos efectos secundarios. Los diferentes tipos de ataques pueden ser observados en la Figura 1.12.

La protección antiproyectiles es uno de los aspectos de mayor importancia en los patrones seguidos a la hora de garantizar la seguridad de un navío.

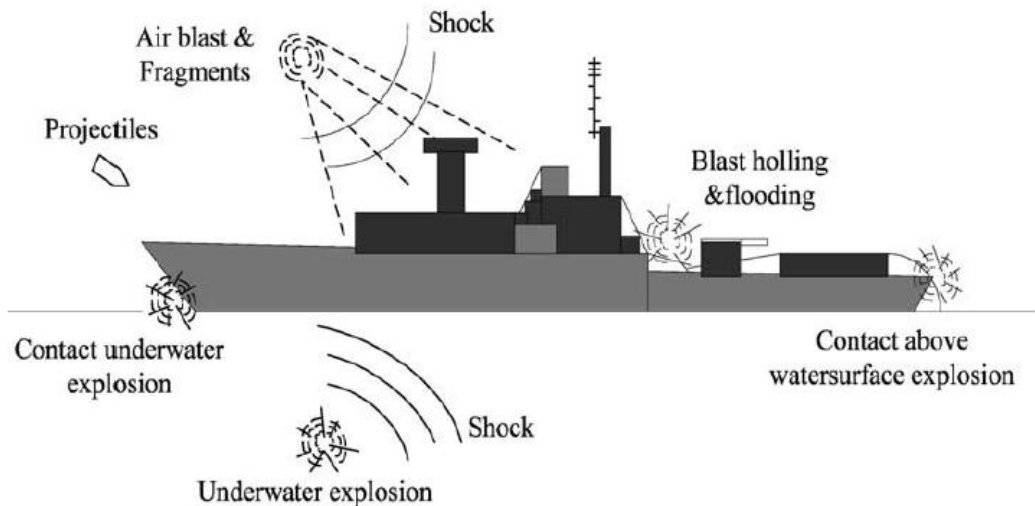


Figure 1.12 Escena de los diferentes tipos de ataque.

Prescindiendo de los accidentes debidos a fallos en la construcción, defecto de materiales o mal diseño, los acorazados se hunden por dos motivos principales: explosión de sus pañoles de municiones e inundación por vías de agua.

1.5.1 Tipos de ataques

En combate, un acorazado puede recibir cuatro tipos de impactos:

1. Cuando un cañón dispara contra un objetivo cercano su elevación es pequeña y por ello la trayectoria del proyectil es rasa, casi sin ángulo. El impacto se producirá así en el cinturón acorazado o en la batería, que son los puntos más protegidos de un acorazado. Una nave bien construida y con una buena coraza no tendría problemas en aguantar este castigo. El problema se halla si los proyectiles perforantes traspasan el blindaje y explotan dentro (los proyectiles pueden ser rompedores, que explotan nada más tocar un obstáculo o perforantes, con cabeza reforzada para penetrar blindajes y que explotan después del impacto, con lo que, si logran perforar el blindaje, estallan dentro de la nave). Los impactos en las superestructuras no deben ser determinantes, aunque provocan incendios muy peligrosos, pero las torres de artillería y el puente de mando se hallan blindados para soportar impactos.

2. Al disparar contra objetivos lejanos, el cañón se eleva para aumentar el alcance, con lo que el proyectil llega con un pronunciado ángulo, es decir, "desde arriba". Por ello se blindaron las cubiertas de los acorazados, porque este impacto es el más peligroso de todos.
3. La amenaza aérea acabó con la supremacía del acorazado al demostrar que estas naves podían aguantar una saturación de impactos al cañón, pero no de bombas aéreas lanzadas en la vertical de la nave y que atravesaban las cubiertas de forma que penetraban en los puntos más vitales de la nave. Así la bomba aérea fue uno de los peligros más mortíferos para el acorazado. Junto con el torpedo, como veremos a continuación.
4. El torpedo, arrojado desde un submarino, un avión u otro barco, tiene menos poder destructivo que una granada de cañón o una bomba aérea, pero golpea en el punto más indefenso de la nave: la parte del barco que queda bajo el agua. Allí donde no hay ninguna coraza porque hubiera sido imposible la parte sumergida, y además la que queda fuera del agua (obra viva). El torpedo es regulado para alcanzar cierta profundidad y a mayor velocidad de la que navega la nave la golpea bajo el agua, por debajo de sus defensas. La espoleta acciona la carga explosiva que explota contra el casco con fuerza multiplicada, ya que el agua aumenta la potencia de la onda expansiva desgarrando el casco de acero.

1.5.2 Hundimiento de un acorazado

En la Segunda Guerra Mundial ningún acorazado moderno se hundía por la explosión de un solo torpedo o una mina, cosa que en la Primera Guerra Mundial ocurrió con frecuencia debido a que los ingenieros habían subestimado esta amenaza. A continuación en la figura 1.13 se muestra la secuencia de hundimiento de un acorazado alcanzado por un proyectil [38].

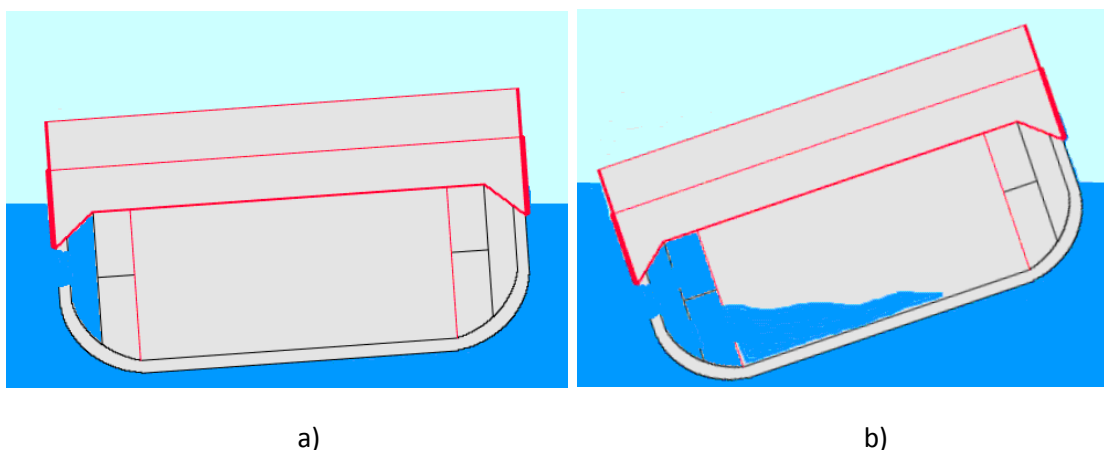


Figura 1.13a Rotura del doble casco de un acorazado. b Inundación del acorazado.

La nave ha sido alcanzada por un torpedo que ha estallado debajo de la parte acorazada. La detonación ha desgarrado el doble fondo del casco e inundado el compartimiento estanco más próximo a él como puede observarse en la figura 1.13a, lo que ha provocado que el aumento de peso escoré la nave hacia la izquierda. Dependiendo de la potencia del torpedo y de la calidad de la construcción el primer compartimento, dañado por la explosión y deformado, aguantará o no. Si ha sido excesivamente dañado por la explosión acabará cediendo al empuje del agua.

Si el primer compartimento no aguanta, la inundación del segundo compartimiento estanco acentúa la escora de la nave. El tercer mamparo está blindado para impedir que la metralla penetre en las salas de máquinas o calderas que protege. En este punto, la nave puede salvarse inundando los compartimientos opuestos para equilibrar el peso, pero todo depende de que el mamparo acorazado resista la presión del agua, multiplicada por la fuerza de gravedad que el peso del agua ejerce sobre el material. La escora aumenta peligrosamente.

Como puede observarse en la figura 1.13b, el compartimento acorazado de la sala interior no ha podido resistir la enorme presión del agua y ha cedido en su zona más vulnerable, la inferior, provocando la inundación de las salas de máquinas y calderas. La nave se hundirá finalmente.

CAPÍTULO II

Descripción y comportamiento del material

2.1 Descripción del material – Acero Weldox 460 E

El acero seleccionado para este trabajo ha sido el Weldox 460 E debido a su elevada producción para este tipo de ensayos, lo cual ha simplificado la obtención de las diferentes propiedades y constantes necesarias para el modelo constitutivo empleado. Además, sus características se asemejan mucho a las de los aceros utilizados en aplicaciones offshore⁵ o marinas.

La designación Weldox es utilizada para un tipo de aceros estructurales que ofrece una alta resistencia y una elevada ductilidad. Estos dos parámetros son de gran importancia para la absorción de energía durante los ensayos de impacto. En concreto, el Weldox 460 E presenta una microestructura excelente debido a los tratamientos termo mecánicos a los que es sometido durante su producción, con partículas de forma irregular distribuidas aleatoriamente, lo cual permite considerar de manera macroscópica a este material como isotrópico. Presenta además una combinación optimizada de ductilidad y resistencia, por lo que ha sido seleccionado para el objetivo en estudio.

⁵ Del inglés: En el mar, o alejado de la costa.

En este trabajo se realizará un estudio del acero Weldox 460 E cuando es sometido al impacto de proyectiles balísticos, lo cual supone de uno de los ensayos más exigentes del mercado para cualquier tipo de material. A continuación en la tabla 2.1 se muestra la composición química del material, en la tabla 2.2 se muestran las propiedades físicas y mecánicas, y por último en la tabla 2.3, las propiedades térmicas.

Tabla 2.1 Composición química (% peso) del acero Weldox 460 E [39].

	C	Si	Mn	S	P	Nb	V
Nominal	0,09	0,25	1,4	0,003	0,018	0,03	0,04
Certificada	0,08	0,26	1,4	0,002	0,008	0,028	0,04
	Ti	Cr	Ni	Mo	B	N	Al
Nominal	0,01	-	-	-	-	0,008	0,025
Certificada	0,01	0,02	0,04	0,007	0	0,006	0,032

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas (valores típicos) del acero Weldox 460 E [39].

	Espesor (mm)	Tensión de cendencia (Mpa)	Tensión de ruptura (Mpa)	Deformación (%)	Dureza (Hb)
Nominal	8-40	460	530-720	19	180
Certificada	6	475	560	26	-
	8	475	575	22	-
	10	504	572	22	-
	12	507	575	22	-
	16	494	569	23	-
	20	480	565	26	-

Tabla 2.3 Propiedades térmicas del acero Weldox 460 E [39].

Densidad (kg/m³)	Conductividad (W/mK)	Calor específico (J/Kg K)	Coeficiente de expansión térmica (K⁻¹)
7850	47	452	1,1 x 10 ⁻⁵

2.2 Modelo constitutivo

A lo largo de los años han sido presentados diversos modelos con diferentes relaciones de funcionalidad. Algunos de ellos contienen numerosos parámetros que deben ser determinados a través de ensayos mecánicos. Estos modelos ofrecen unos resultados de gran precisión en muchas circunstancias, pero también pueden presentar problemas de calibración; especialmente cuando los parámetros físicos utilizados no permiten una interpretación del modelo a nivel macro-escalar. Como alternativa, los modelos simples que utilizan un número más reducido de parámetros han ganado popularidad en los ensayos numéricos. Uno de los más utilizados es el modelo de Johnson-Cook (1985) [40]. Este modelo se presenta como una evolución del modelo de Hancock y Mackenzie (1976) [41]. En el modelo de Johnson-Cook con dependencia del estado triaxial, considera los efectos de las elevadas deformaciones y de temperatura, en la fractura de metales dúctiles.

2.2.1 Definición del comportamiento termoviscoplastico del material

Para la simulación del comportamiento del material durante el impacto ha sido utilizado el modelo de Johnson-Cook [39]. Este modelo propone una relación que ha sido ampliamente utilizada debido a su gran versatilidad, y su formulación explícita se expresa en la ecuación 2.1:

$$\bar{\sigma} = \left[A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}} \right) \right] (1 - \check{T}^m) \quad (2.1)$$

Donde el primer término define el endurecimiento por deformación, el segundo la sensibilidad a la velocidad de la deformación, y el tercero, la sensibilidad a la temperatura.

Los valores de los parámetros utilizados para el modelo de Johnson-Cook se muestran en la tabla 2.4. Como no siempre es posible encontrar los datos que se requieren para el material necesitado, los valores de los parámetros en la tabla corresponden a los del material con propiedades mecánicas más similares al material de acero naval empleado para nuestro estudio. Así, las propiedades mostradas en la siguiente tabla corresponden al acero Weldox 460 E.

Tabla 2.4 Constantes del acero Weldox 460 E. Modelo JC [38].

Comportamiento termoviscoplastico					
A(Mpa)	B(Mpa)	C	n	m	Tf (K)
490	807	0.0123	0.73	0.94	1800

2.2.2 Modelo de fallo de Johnson-Cook

El modelo de fallo de Johnson-Cook [44] es un modelo acumulativo que tiene en cuenta todo el historial de la carga presente, siendo representado por la deformación hasta la fractura. La

deformación hasta la fractura se expresa en función de la tasa de deformación, de la temperatura, y de la presión. El criterio propuesto por este autor es un caso especial de un criterio de ductilidad. Este modelo incluye los efectos del estado de tensión triaxial, de la tasa de deformación y de la temperatura. Estos efectos quedan representados en la expresión de la deformación plástica equivalente, $\bar{\epsilon}_f^{pl}$, representada de la siguiente forma:

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \sigma^*)] \left[1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] (1 + d_5 \tilde{T}) \quad (2.2)$$

Donde $d_1 - d_5$, son constantes del material [38]. Para su aplicación del modelo de fallo al programa comercial de elementos finitos Abaqus, se han utilizado los valores de estos parámetros que se muestran a continuación en la tabla 2.5:

Tabla 2.5 Constantes del modelo de fallo de JC para el acero Weldox 460 E [38].

d1	d2	d3	d4	d5	T (K)
0,0705	1,732	0,54	0,015	0	293

Donde T_m es la temperatura de fundición del acero, y T, la temperatura del ambiente en el que se realiza el ensayo.

CAPÍTULO III

Modelación numérica

3.1 Introducción a la simulación por el Método de Elementos Finitos

En la actualidad, el uso de los métodos numéricos se ha vuelto una herramienta fundamental a la hora de realizar cualquier tipo de investigación. Debido a su rapidez de ejecución, y sobre todo a su bajo coste, la realización de simulaciones numéricas cubre un amplio sector dentro de la ingeniería y áreas de investigación. El método de los elementos finitos es un procedimiento numérico que puede ser utilizado para resolver numerosos problemas en el ámbito ingenieril, desde el análisis de tensiones, transferencia de calor, electromagnetismo, o comportamiento de fluidos.

En general, los problemas de ingeniería son modelaciones matemáticas de situaciones con fundamento físico. Los modelos matemáticos son ecuaciones diferenciales con condiciones de contorno y parámetros iniciales previamente definidos. Esas ecuaciones son el resultado de la aplicación de leyes fundamentales para sistemas o volúmenes de control, y de esa forma, representando un balance de masa, fuerza, y energía, del fenómeno que se está estudiando.

La primera tarea en el MEF consiste en la modelización geométrica del sistema que se quiere analizar. Esta modelización se consigue a través de herramientas de diseño del tipo CAD⁶. El MEF es un método numérico que ofrece una solución aproximada de la distribución de un conjunto de variables de un dominio propio, y que sería de gran dificultad obtenerlo analíticamente. Esa solución se encuentra a través de la división de ese dominio en varios

⁶ Del inglés: Computer Aided Design – Diseño Asistido por Computador

elementos, como se muestra en la figura 3.1. Los denominados elementos finitos pueden tener diferentes tipos de geometrías, como por ejemplo, tetraedros o hexaedros. Después de este proceso de división es cuando son aplicadas las leyes físicas (principio del trabajo virtual) a cada elemento, obteniendo así las matrices de rigidez y los vectores de fuerzas internas de cada elemento. A continuación, las diversas matrices de rigidez y los vectores de fuerzas internas de cada elemento son agrupados en una matriz global para toda la estructura que se analiza. A partir de esa matriz global de rigidez y vectores de fuerzas internas es donde se aplica después las condiciones de contorno y el vector de variables primarias (solución del problema) puede ser obtenido [42].

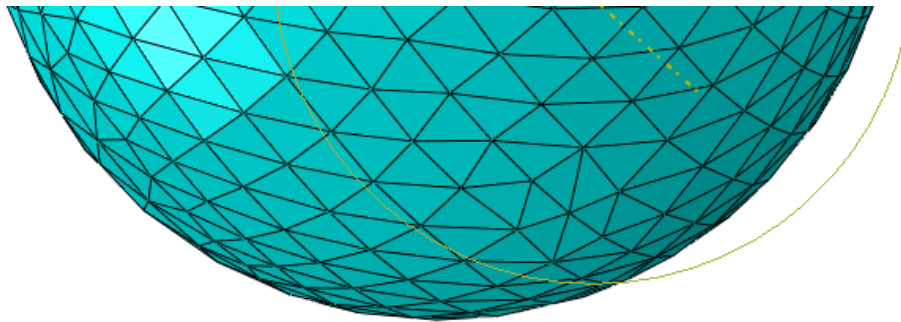


Figura 3.1 Sección hemisférica discretizada en varios elementos finitos.

Es de gran importancia la realización de una correcta definición de los modelos del comportamiento de los materiales para obtener unos resultados razonables. En el área del cálculo estructural, los modelos de comportamiento o los modelos constitutivos se representan de varias formas, como por ejemplo: (1) Elástico lineal, en el cual después de la aplicación de la carga el material retoma su forma inicial; (2) plástico no lineal, en el que no existe linealidad alguna entre la carga aplicada y la deformación sufrida, siendo esta deformación permanente; (3) elasto-plástico, el cual presenta una fase inicial con un comportamiento elástico y otra con un comportamiento plástico; (4) viscoelástico y viscoplástico, cuando la respuesta del material depende del tiempo (velocidad).

Para definir completamente el modelo de comportamiento de un material se vuelve imprescindible la obtención de diversas propiedades físicas y mecánicas, como por ejemplo, el coeficiente de Poisson, y el módulo de elasticidad entre otras. Esta fase de definición precede a la fase del análisis y cálculo del problema propuesto.

De esta forma, se puede resumir el análisis con base en el Método de los Elementos Finitos en varias etapas:

1. Modelación del problema real en análisis.
2. Generación de la malla de elementos finitos.

3. Definición del sistema de cargas.
4. Definición de las condiciones de frontera.
5. Definición de los materiales y sus respectivas propiedades.
6. Cálculo numérico.
7. Visualización y análisis de los resultados.

3.2 Programa de simulación numérica: Abaqus

Abaqus es una palabra griega que deriva del término *Aba-kala-culus*, que significa la memoria de la solución. *AbaqusTM* es un paquete de software comercial de análisis por el Método de los Elementos Finitos desarrollado por la empresa HKS Inc, siendo actualmente comercializado por SIMULIA, una marca de *Dassault Systemes SA*. El programa *AbaqusTM* incluye cuatro componentes funcionales; los módulos de análisis, los módulos de pre procesamiento CAE⁷, el módulo de post procesamiento, y un módulo de varias utilidades. El programa de simulación numérica *AbaqusTM* está constituido por tres productos principales: Abaqus/CAE, Abaqus/Standard y Abaqus/Explicit [43].

En el módulo de pre-procesamiento (Abaqus/CAE) es el que el usuario define las características del problema que va a analizar. En este módulo es posible definir la geometría de la estructura que se va a utilizar, definir las características del material, la aplicación de las cargas y las condiciones de frontera del problema, la definición del número de etapas que tendrá el análisis, y la creación de la malla de elemento finitos apropiada para el tipo de ensayo.

Abaqus/CAE ofrece un ambiente completo de modelación y visualización para el análisis de los productos de *AbaqusTM*. Por su acceso directo a los modelos de CAD, la creación de mallas avanzadas, así como su visualización; Abaqus/CAE se ha vuelto uno de los software preferidos por los usuarios. Este módulo crea un fichero binario con extensión “*.cae”, el cual contiene todas las informaciones que definen el análisis. Para visualizar los resultados, se crean ficheros con la extensión “*.odb” y “*.fil”.

La ejecución de la simulación numérica puede ser realizada a través de los módulos Abaqus/Standar o Abaqus/Explicit. Abaqus/Standar es una solución generla que se utiliza en un esquema de integración implícita en la resolución del análisis de elementos finitos. Abaqus/Explicit utiliza un esquema de integraciones explícitas en la resolución de problemas dinámicos y no lineales, y en análisis cuasi estáticas. *AbaqusTM* dispone también de un post procesador, Abaqus/Viewer, que opera sobre los ficheros de salida, haciendo posible así la interpretación gráfica de los resultados numéricos obtenidos. Las diversas potencialidades de *AbaqusTM* permiten que problemas de elevada complejidad en el ámbito de la ingeniería, con geometrías complicadas, relaciones constitutivas no lineales, presencia de grandes

⁷ Del inglés: *Computer Aided Engineering* – Ingeniería Asistida por Computador.

deformaciones y con aplicaciones de carga con variación del tiempo, por ejemplo, puedan ser modelados numéricamente.

3.3 Descripción de los ensayos realizados

Los ensayos que a continuación serán descritos han servido para obtener todos los resultados que se verán en este trabajo. La precisión de los mismos dependerá de la cantidad de parámetros incluidos y de su correcta utilización. Dada la limitada capacidad de computación que tiene un ordenador de uso doméstico, la precisión de los resultados está limitada a la cantidad de nodos o elementos máxima que es capaz de procesar el ordenador. No obstante, dicha capacidad se ha llevado al límite para tratar de ofrecer las mejores soluciones posibles.

Para el ensayo descrito de un proyectil que impacta sobre un buque acorazado, se han realizado algunas simplificaciones para su correcta simulación. Se trata de un buque de 500 toneladas con un doble casco de acero de 10 y 6 mm respectivamente de espesor. Será evaluado en todos los casos mediante dos velocidades de disparo diferentes; 898 y 1128 m/s. También será discutido el caso de que el disparo perfora el doble casco.

Para todas las configuraciones, la malla óptima se ha obtenido mediante un método de convergencia. Es decir, consiguiendo la estabilidad de los resultados con independencia de la malla.

A continuación serán explicadas todas las simulaciones realizadas y su evolución. En la tabla 3.1 se puede observar un resumen de todos los ensayos realizados. Los resultados serán expuestos en el siguiente capítulo.

Tabla 3.1 Ensayos realizados para un acorazado de 500 toneladas con doble casco de acero.

Ensayo	Espesor del casco (mm)	Espesor del doble casco (mm)	Velocidad inicial del proyectil	Modelo de fallo	Número de nodos
test1128	10	-	1128	Fallo por deformación (100%)	5006
H1128	10	-	1128	Johnson-Cook	617917
B1128	10	6	1128	Johnson-Cook	634068
H898	10	-	898	Johnson-Cook	617917
B898	10	6	898	Johnson-Cook	634068

Los ensayos han sido denominados dependiendo de si cuentan sólo con el primer casco (H - *hull*) o con el doble casco (B - *bulkhead*), además de la velocidad con la que es disparado el proyectil inicialmente. A excepción del primer ensayo que se trata de un ensayo (Test1128) de prueba en el que fueron corregidos varios fallos para todos los ensayos posteriores.

Test 1128

Una placa de acero cuadrada de un metro de lado, y 10mm de espesor será utilizada para simplificar el casco del acorazado. El acero utilizado, como ya se ha explicado en el capítulo anterior será el Weldom 460 E. El proyectil será una esfera maciza de acero de 12.6 mm de diámetro con una masa de 13.4 gramos. La trayectoria del proyectil será totalmente perpendicular al plano, y este será disparado a una velocidad de 1128 m/s.

Para comenzar a describir el modelo, lo primero hay que crear las PARTS que compondrán el ensayo. Para crear la placa llamada *"target"*, se ha seleccionado como sólido deformable en 2D, del tipo *"Shell"*, y con un espesor de 10mm, asignado posteriormente en el módulo PROPERTY⁸. Para el proyectil denominado *"ball"*, se ha seleccionado también un sólido deformable en 3D, sin embargo, para simplificar la operación, se ha realizado por revolución con un diámetro de 12.6 mm.

El siguiente módulo PROPERTY es en el cual se describen los materiales, y son asignados a sus correspondientes elementos. Para la esfera sólo ha sido necesario describir las propiedades elásticas y su densidad, ya que no es el elemento sobre el cual va a ser evaluado el impacto. Para la placa ha sido necesario introducir otros parámetros adicionales como la plasticidad, daño para materiales dúctiles, y su deformación de fractura.

En el módulo ASSEMBLY, ha sido escogida la opción *"dependent instance"* ya que de esta forma, el mallado puede ser hecho en cada PART por separado; es decir, se podrá realizar un mallado para el proyectil, y otro totalmente diferente para la placa. Lo cual resulta de gran importancia a la hora de mallar la esfera, que con elementos cúbicos utilizados para la placa, sería imposible de mallar.

Para realizar el mallado en el módulo MESH lo haremos en dos partes: Por un lado el proyectil *"ball"* será mallado utilizando elementos tetraédricos del tipo *"C3D4: A 4-node linear tetrahedron"*. Como se puede observar en la figura 3.2 la malla queda perfectamente estructurada y adaptada a la forma esférica. Por otro lado, para la placa *"target"* serán utilizados elementos del tipo *"C3D8R: An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control"*, con los que queda una malla muy bien estructurada también. En el caso de la placa, la malla no es del todo refinada y los resultados no tienen la precisión requerida; no obstante, en el primer ensayo utilizamos este tipo de malla por su simplicidad y rapidez a la hora de simular el ensayo para posteriormente corregir errores. Más adelante se puede ver la nueva malla mejorada, y mucho más adaptada al centro; que es la zona donde tendrá lugar el impacto.

⁸ Esta asignación del espesor es exclusiva para placas del tipo Shell, las cuales por simplicidad se simulan como placas en 2D; y su espesor es asignado como una propiedad del material.

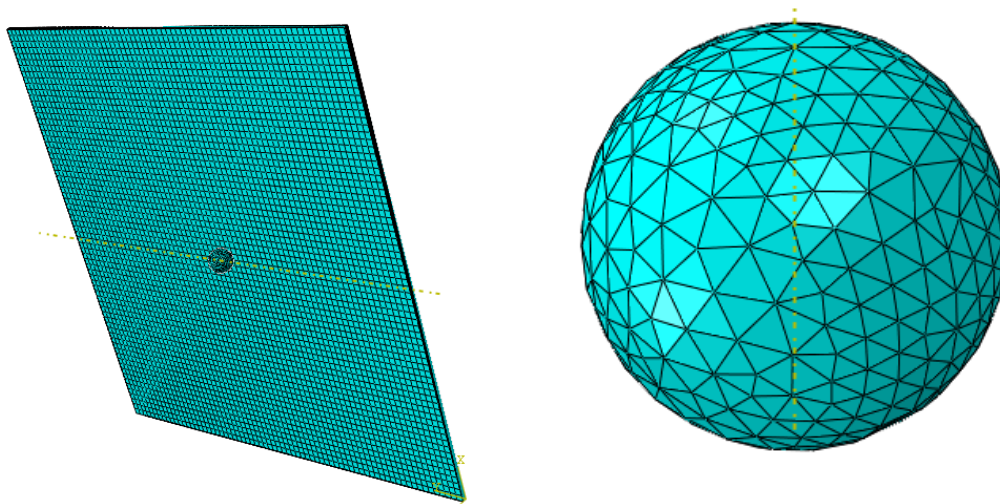


Figura 3.2 Mallado de la placa y el proyectil.

En el módulo STEP se define la duración del ensayo. Con una simple aproximación, calculamos el tiempo que tardará el proyectil en impactar con la placa, puesto que conocemos la distancia de separación entre ambos, y la velocidad inicial del proyectil. Los incrementos en este primer ensayo serán de 1×10^{-8} segundos, y el tiempo total del ensayo será 0.0003 segundos, esto es para que el análisis no sea demasiado pesado para el computador. En los análisis posteriores se aumentará considerablemente el tiempo del ensayo, y se disminuirán los incrementos, para conseguir así una mayor visión del impacto y lo que ocurre posteriormente.

A continuación, en INTERACTION, serán definidas la relación que existirá entre el proyectil y la placa. En este caso, como se trata de un ensayo de impacto, seleccionaremos *“general contact”* y las propiedades del contacto utilizaremos el tipo *“penalty contact”*, con un coeficiente de fricción de 0.5 entre el proyectil y la placa.

En el módulo LOAD es donde se establecen las condiciones de contorno; uno de los factores más importantes del ensayo. Para la placa, todos sus bordes serán encastrados, con desplazamiento y rotación nula; simulando así que es un elemento extraído del casco del barco. Para el proyectil, será necesario crear un *“predefined field”* en el que se describirá la trayectoria y velocidad con la que será lanzado. Serán introducidos así los valores nulos para las velocidades en los ejes X e Y; y el valor 1128 para el eje Z.

Finalmente, será lanzado el ensayo en el módulo JOB. Como puede observarse en la figura 3.3 no son unos resultados del todo reales. En los ensayos posteriores serán corregidos los fallos, la malla será mucho más refinada, y aumentará considerablemente el tiempo del ensayo.

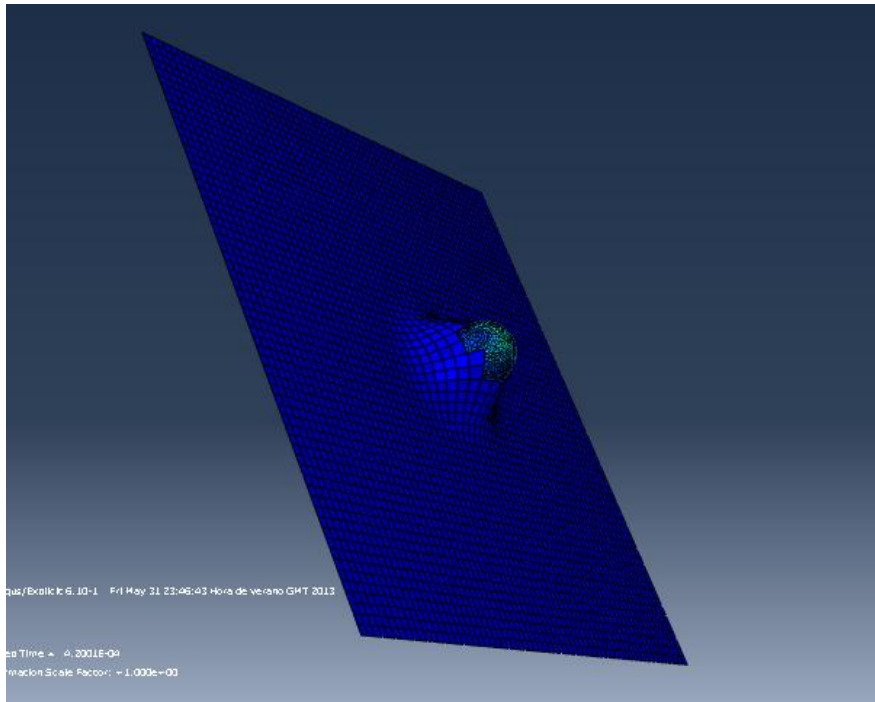


Figura 3.3 Resultados del test 1128.

H1128

En este ensayo se han observado todos errores del primer test de prueba, y han sido corregidos. A partir de aquí, todos los ensayos realizados son de rigurosa precisión (dentro de las posibilidades disponibles) y serán explicadas las novedades que incluyen respecto al ensayo anterior.

Primero, en la creación de las PARTS, un modelo del tipo *“discrete rigid”* en 3D fue seleccionado para el proyectil debido a que la deformación del mismo no es el objeto de estudio del presente proyecto y puede considerarse despreciable. Se consiguió simplificar un poco el proceso al no ser necesario atribuir ningún material a este por su condición de sólido rígido. Fue necesario definir su masa, sus momentos de inercia en los tres ejes (en este caso simétricos), y definir también un RP (punto de referencia) sobre el cual iban a actuar las condiciones de contorno como la velocidad aplicada al proyectil. Para la placa *“target”*, fue seleccionada el tipo *“deformable solid”* en 3D en vez de tipo *“Shell”* en 2D como en el ensayo anterior. Esto fue debido a que a la hora de visualizar los resultados de la perforación, era necesario poder observar todos los nodos que componían el espesor de la placa; y esto, de la otra forma, aunque simplificase bastante los cálculos, no era posible con el tipo *“Shell”* al considerarse un elemento sólo en plano XY.

En el módulo PROPERTY, debido a la excesiva deformación que sufría la placa en el test anterior, fue necesario describir un modelo de plasticidad y de fallo de Johnson-Cook. En el capítulo 2, pueden observarse en las diferentes tablas, todos los parámetros introducidos en el programa para definir este modelo. Como se puede comprobar en el siguiente apartado de resultados, la simulación del ensayo mejoró notablemente con los modelos introducidos de fallo y plasticidad.

En el módulo INTERACTION se cambió el tipo de contacto, de “*general contact*” por “*surface to surface contact*”. Con este segundo modelo de contacto se obtenían mejores resultados, también fue sustituido el tipo de comportamiento tangencial del contacto; de tipo “*penalty*” con un coeficiente de fricción de 0.5, pasamos a un comportamiento del tipo “*frictionless*” dado que las fuerzas de rozamiento son despreciables comparado con la fuerza de penetración del proyectil.

En LOAD, las condiciones de contorno fueron las mismas, la placa encastrada en toda la superficie de su perímetro, y el proyectil con una velocidad inicial de 1128 m/s.

La malla fue el elemento que mayor modificación necesitaba, se aumentaron el número de elementos hasta 150 por cada arista de la placa, con un “*double-bias*” de factor 12, consiguiendo así un refinamiento muy superior para la parte central de la placa que es donde será recibido el impacto como puede observarse en la figura 3.4 En la dirección del espesor, un elemento cada 0.2 mm fue asignado como sugiere Borvik et al. (2002) en [44].

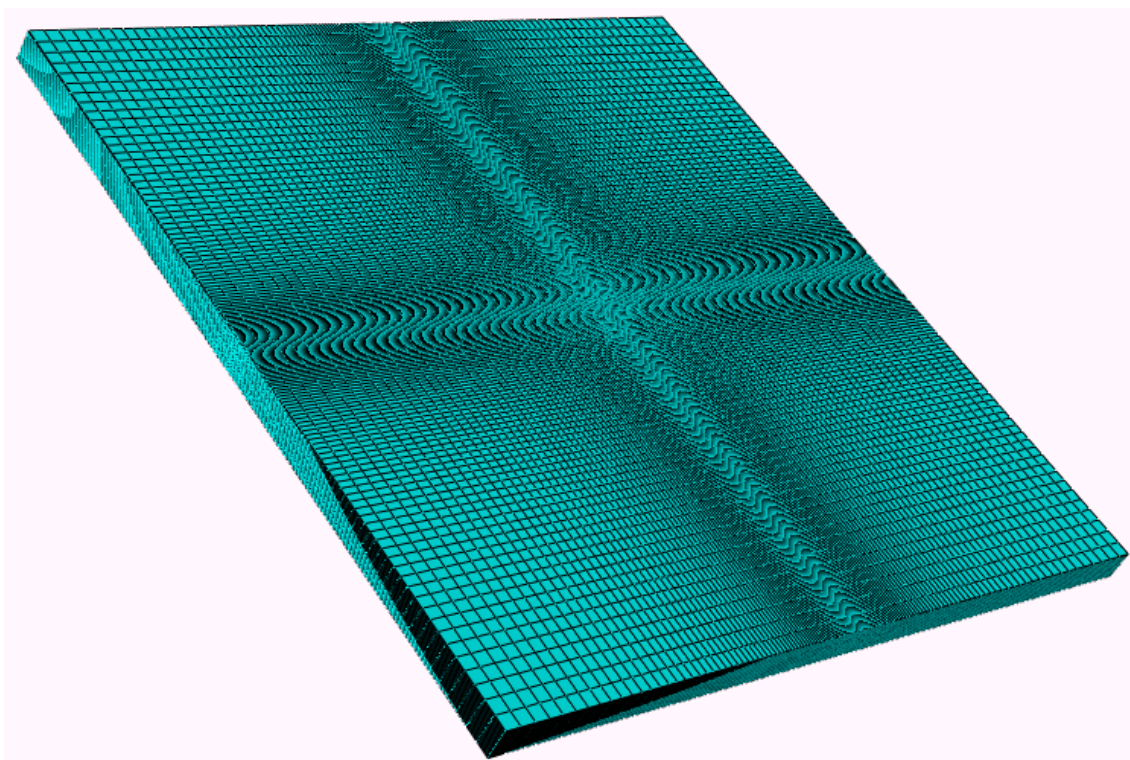


Figura 3.4 Mallado para la placa “target” con elementos del tipo C3D8R.

Para el proyectil “*ball*” fueron asignados elementos del tipo “*quad-dominated*” con un mallado libre en algunas zonas y “*mapped*” donde es posible. El cambio respecto al anterior mallado triangular se debe únicamente a que el nuevo mallado ofrece mejores resultados. En la figura 3.5 puede observarse con detalle el mallado, y como corresponde dimensionalmente con el mallado de la placa donde va a impactar.

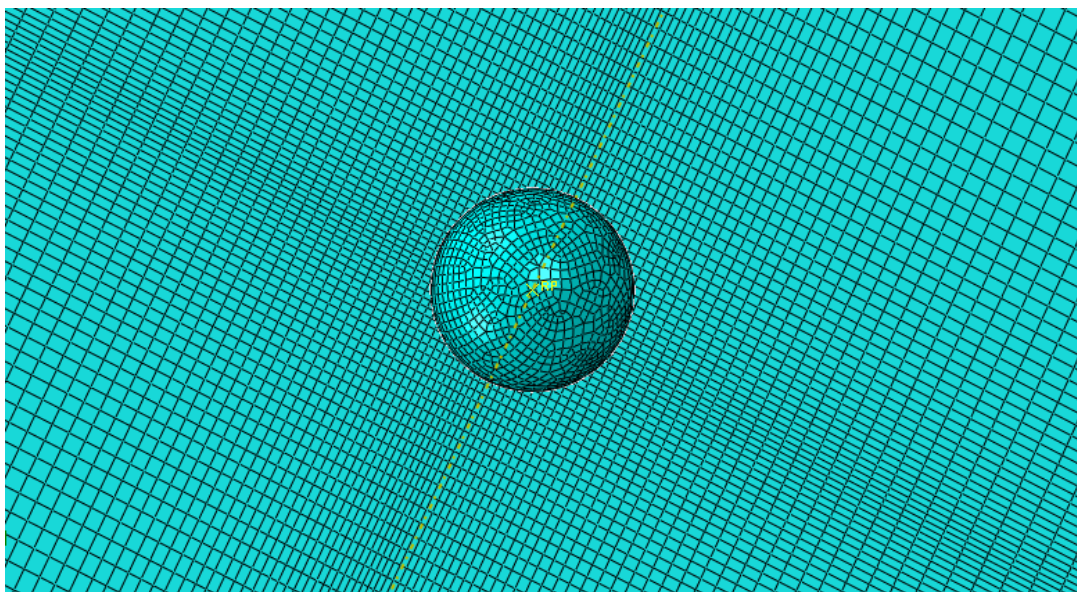


Figura 3.5 Mallado para el proyectil “ball” con elementos del tipo R3D4.

En el módulo STEP fue definido un tiempo total del ensayo de 3×10^{-5} segundos, suficiente para que el proyectil penetre por completo la placa, y alcance de nuevo velocidad constante después de la penetración. El tiempo de incremento fue establecido como automático. Sin embargo, para la obtención de resultados en el “*field output*”, se seleccionó un total de 500 incrementos para los cuales obtener resultados deseados para el siguiente capítulo.

B1128

En este ensayo, el segundo casco (*bulkhead*) fue introducido en el modelo. Para ello se diseñó otra placa cuadrada de idénticas características a la anterior pero con espesor de 6mm. Para las condiciones del contacto, se ensamblaron ambas placas con una distancia de 6 veces el espesor entre ellas, para que los residuos de la primera perforación no interfiriesen en el segundo impacto contra el doble casco. En la figura 3.6 puede observarse un esquema de este tipo de ensayo con doble casco, en el que la velocidad residual del primer impacto, será la velocidad inicial o de lanzamiento para el segundo impacto. Las propiedades del material son las mismas que para el ensayo anterior.

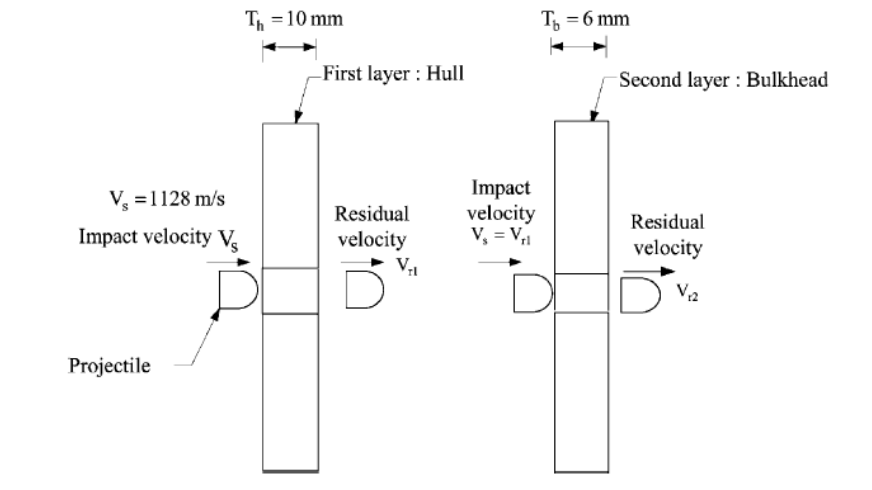


Figura 3.6 Esquema del proyectil impactando con el casco y el doble casco [36].

Para el mallado, fue necesario reducir el número de elementos por placa respecto al anterior ensayo, ya que si sumábamos los nodos de ambas placas, sobrepasamos los límites de cálculo del computador utilizado. En la figura 3.7 pueden observarse el mallado de ambas placas junto con el proyectil. Aun no pudiendo alcanzar el mismo número de nodos como en el anterior ensayo, se han ajustado al máximo para así obtener la mayor precisión posible en los resultados.

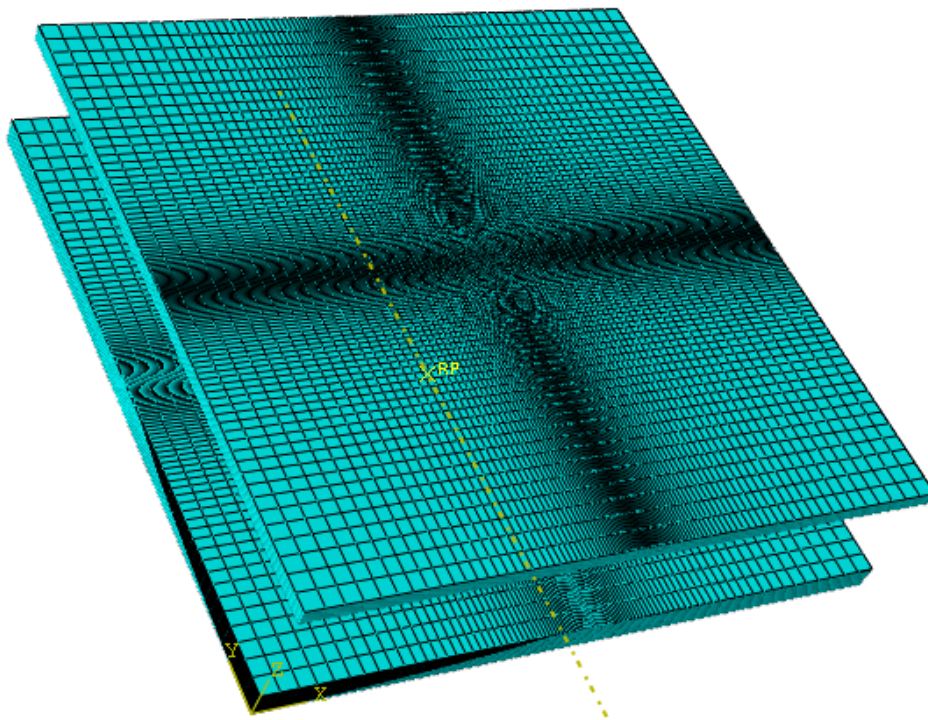


Figura 3.7 Mallado del casco (*hull*) y del doble casco (*bulkhead*).

H898

En este ensayo simplemente se ha reducido la velocidad del proyectil a 898 m/s para observar las diferencias en la perforación, el cráter de entrada y la absorción de energía cinética. Este ensayo se ha realizado tanto con el modelo de un solo casco, como con el de doble casco, para poder comparar resultados correctamente con los otros modelos anteriores. Debe recordarse que las placas llevan diferentes mallados debido a la limitación de nodos por temas computacionales.

B898

El ensayo B898 muestra el caso de impacto con el doble casco separado a una distancia de 6 veces el espesor del primer casco a una velocidad sensiblemente inferior a la anterior. En el próximo capítulo de resultados se podrá observar si el doble casco en este caso es capaz de resistir la perforación del proyectil o no.

Capítulo IV

Resultados

4.1. Sumario de los resultados obtenidos

En la siguiente sección se detallarán y discutirán los resultados obtenidos para los diferentes ensayos a partir de su simulación numérica en Abaqus. Para estos análisis hay que recordar que el proyectil fue descrito como un elemento sólido rígido. Serán ilustrados a continuación los modelos de fallo de cada uno de los impactos, las velocidades residuales de los proyectiles después de la perforación en el caso de que exista, el gradiente de energía del proyectil, y también el tiempo que transcurre en la perforación del proyectil.

El motivo porque se han realizado los ensayos a varias velocidades, para una placa sólo, y también para las dos placas (doble casco), se debe a la posibilidad de desarrollar un mallado mayor en el modelo de una placa y obtener así un resultado más preciso para posteriormente poder comparar con el modelo de doble casco, y así saber que la velocidad residual del primer impacto, que será la velocidad inicial del segundo impacto; es la correcta.

A continuación en la tabla 4.1 se expondrá un breve esquema de los resultados de los diferentes ensayos:

Tabla 4.1 Resumen de los resultados de los ensayos realizados.

Ensayo	e_h (mm)	e_b (mm)	v_i (m/s)	v_{rh} (m/s)	v_{rb} (m/s)	Resultado
h1128	10	-	1128	722,1	-	Perforación
b1128	10	6	1128	721,8	373,1	Perfora el doble casco
h898	10	-	898	314,3	-	Perforación
b898	10	6	898	312,2	0	Perfora sólo el primer casco

e_h – espesor del primer casco (*hull*);

e_b – espesor del segundo casco (*bulkhead*);

v_i – velocidad inicial del proyectil;

v_{rh} – velocidad residual del proyectil después del primer impacto;

v_{rb} – velocidad residual del proyectil después del segundo impacto.

4.2 Modos de fallo

El resultado que fue analizado con mayor prioridad al terminar los ensayos fue la dependencia del modelo de fallo en función diversos factores. En todos los ensayos de impacto el factor que más determina el modelo de fallo es la forma del proyectil. En el caso de este proyecto, al tener el mismo tipo de proyectil para todos los ensayos, el parámetro más determinante fue la velocidad de lanzamiento.

En el caso de emplear proyectiles esféricos, como su puede observar en las figuras 4.1, 4.2, 4.3, y 4.4, se producen estados tensionales de compresión y tracción debido a la flexión incipiente de la placa, lo que reduce el espesor de material arrancado (tapón) en comparación con otro tipo de proyectiles como los planos (cilíndricos). El modo de fallo de la placa generalmente es una combinación de ASB⁹ y *necking*, que pueden manifestarse de dos formas dependiendo de la velocidad del impacto. Para velocidades elevadas, el fallo ocurre mediante la formación de una garganta (*necking*), pudiendo arrancarse un tapón de material de espesor reducido (véase figura 4.1). Para velocidades bajas, próximas al límite balístico, el fallo sucede mediante la formación de pétalos, y no existe la formación de un tapón de material (véase figura 4.3). De este modo, puede considerarse para este tipo de proyectiles que la velocidad de impacto influye de modo determinante en la distribución energética y en el modelo de fallo.

⁹ Del inglés: Adiabatic Shear Bands

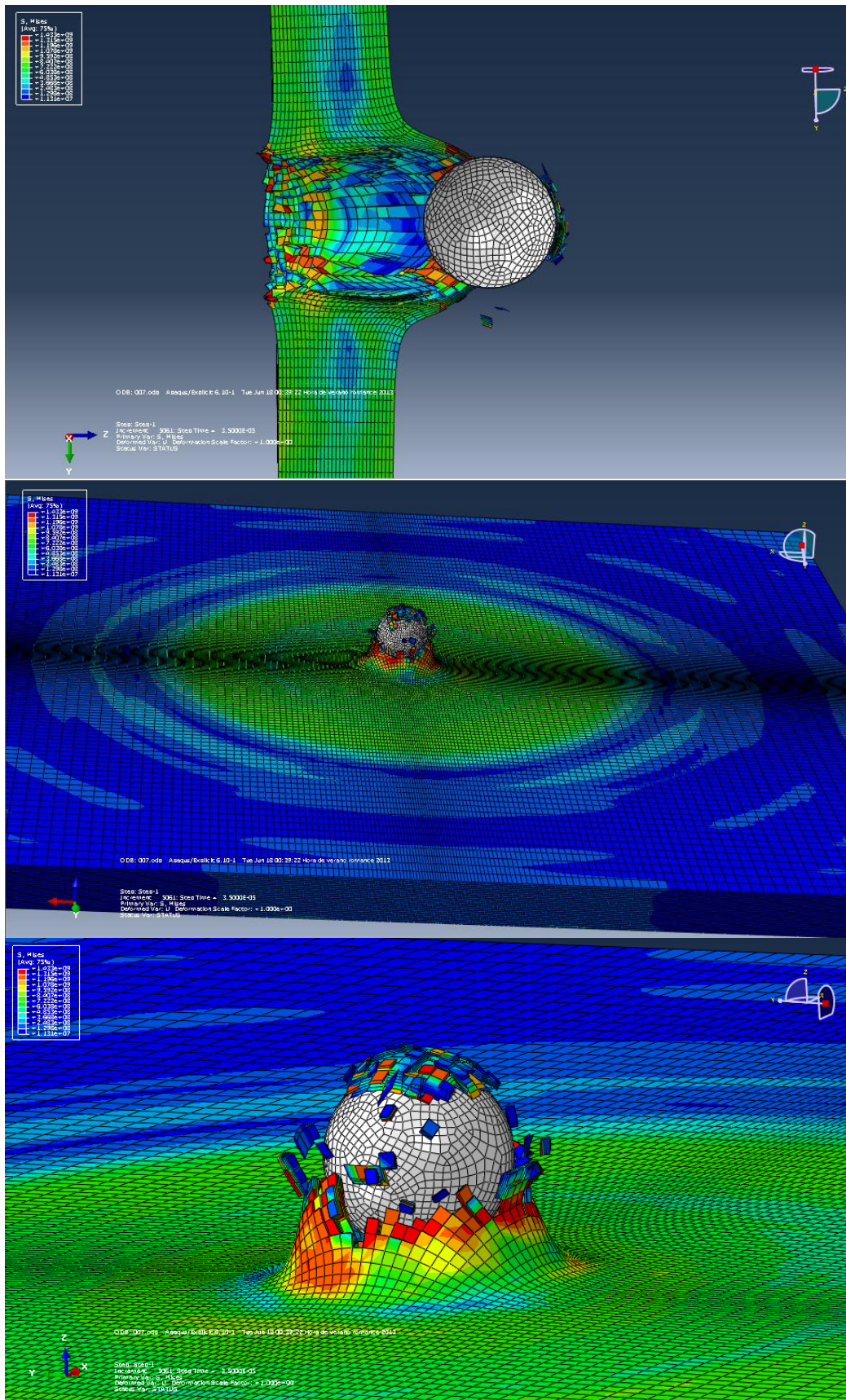


Figura 4.1 Modo de fallo del ensayo numérico h1128.

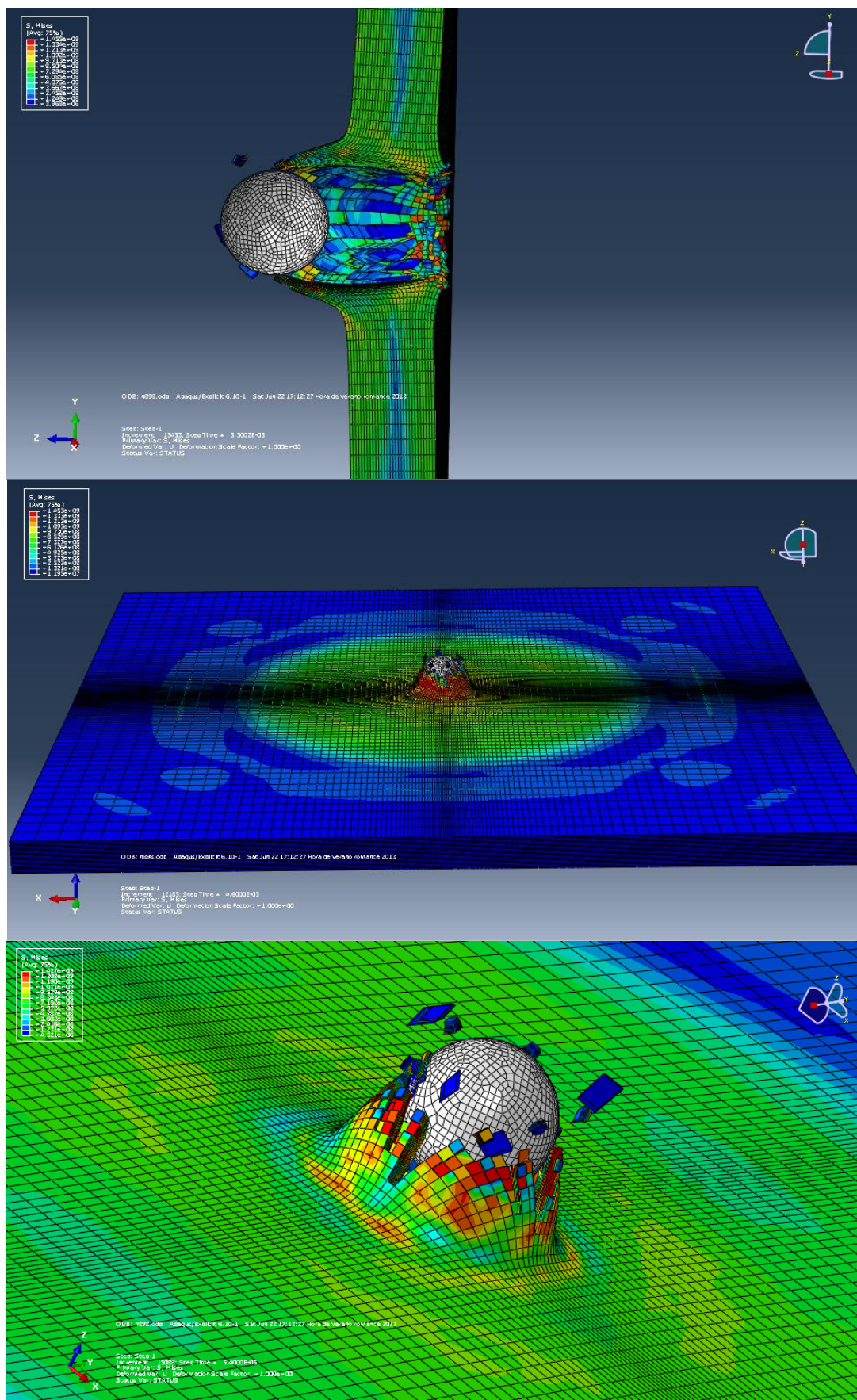


Figura 4.3 Modo de fallo del ensayo numérico h898

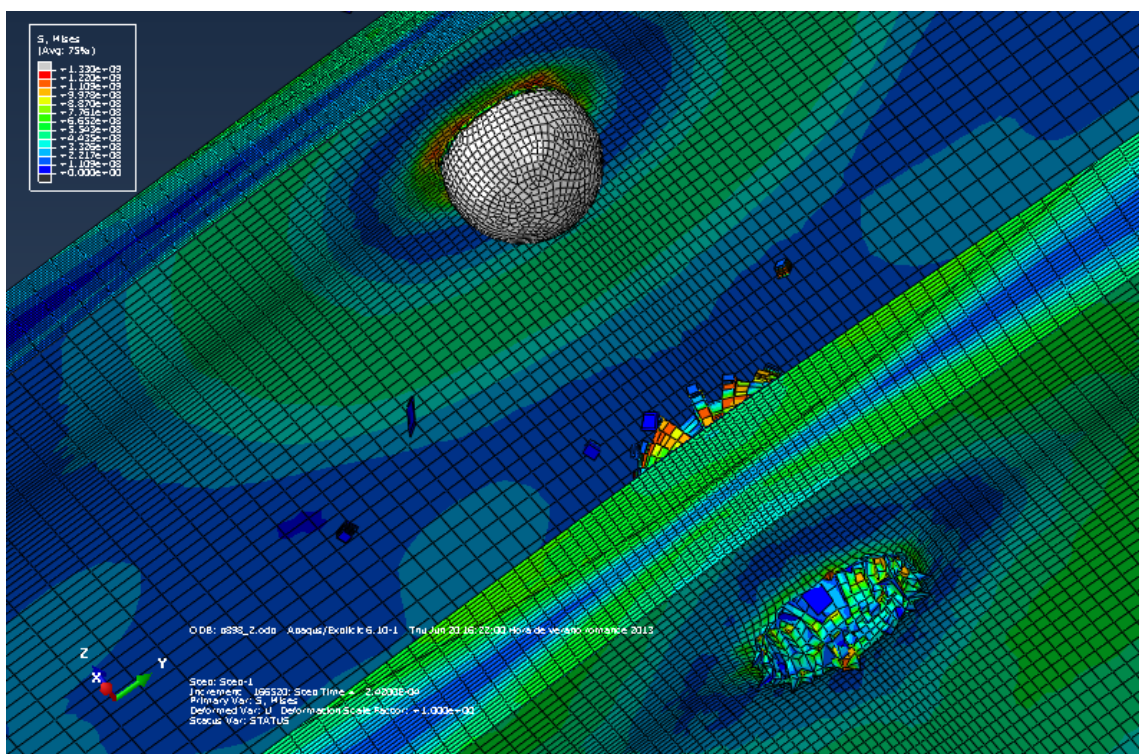
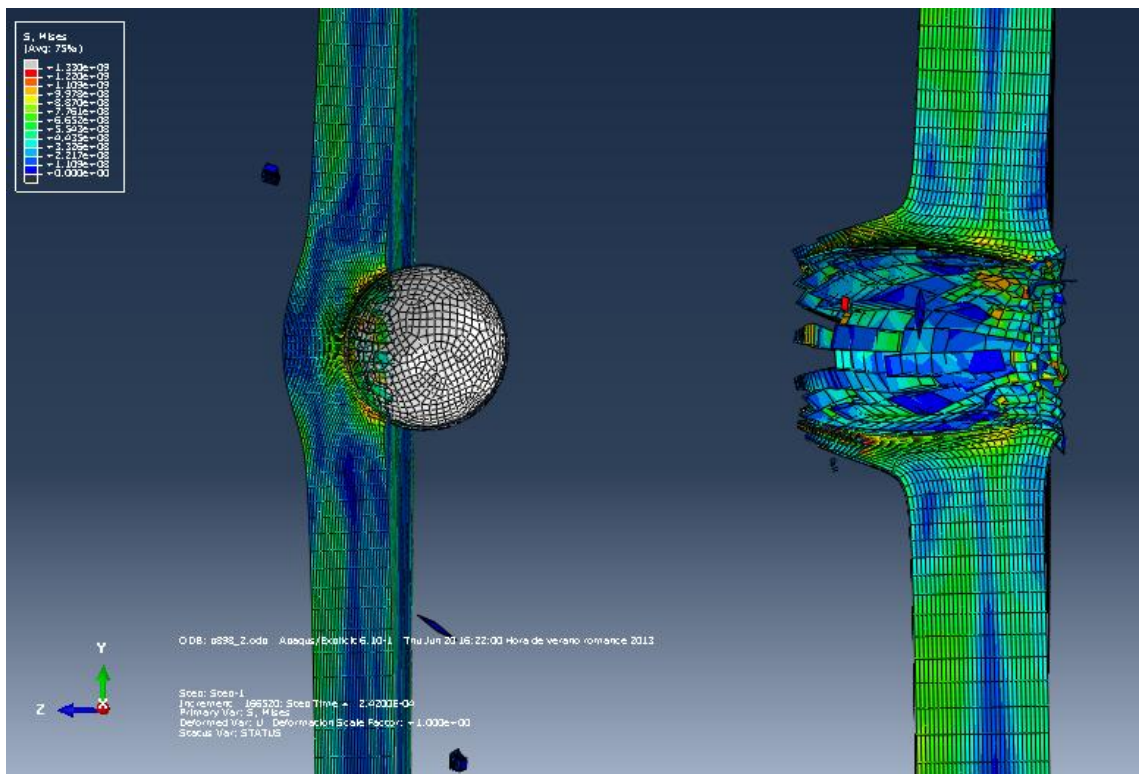


Figura 4.4 Modo de fallo del ensayo numérico b898.

4.3 Velocidad residual

En las siguientes figuras de la 4.5 a la 4.8 se puede observar como varía la velocidad en función del tiempo de ensayo, y en función de la distancia recorrida por el proyectil. Es interesante observar en los casos con doble casco, como la velocidad decrece, luego adquiere un valor constante (despreciando fuerzas externas) y como vuelve a decrecer en el impacto con el segundo casco. En el cuarto ensayo, el proyectil atraviesa el primer casco, pero no el segundo, por lo que puede observarse como su velocidad final es cero después del segundo impacto.

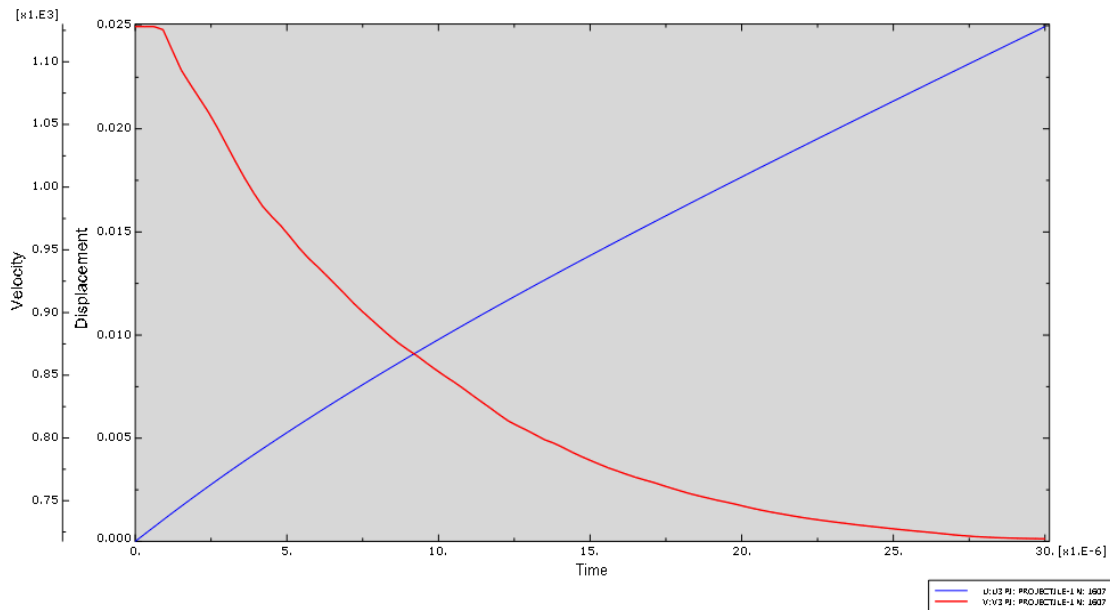


Figura 4.5 Velocidad del proyectil en función del tiempo y la distancia para el ensayo h1128.

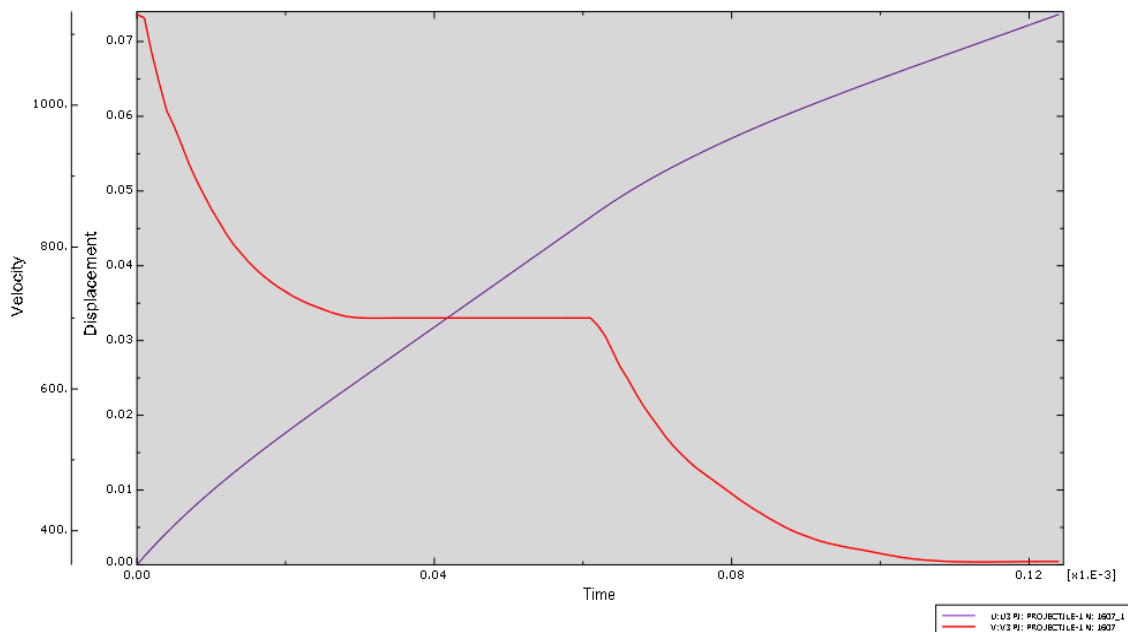


Figura 4.6 Velocidad del proyectil en función del tiempo y la distancia para el ensayo b1128.

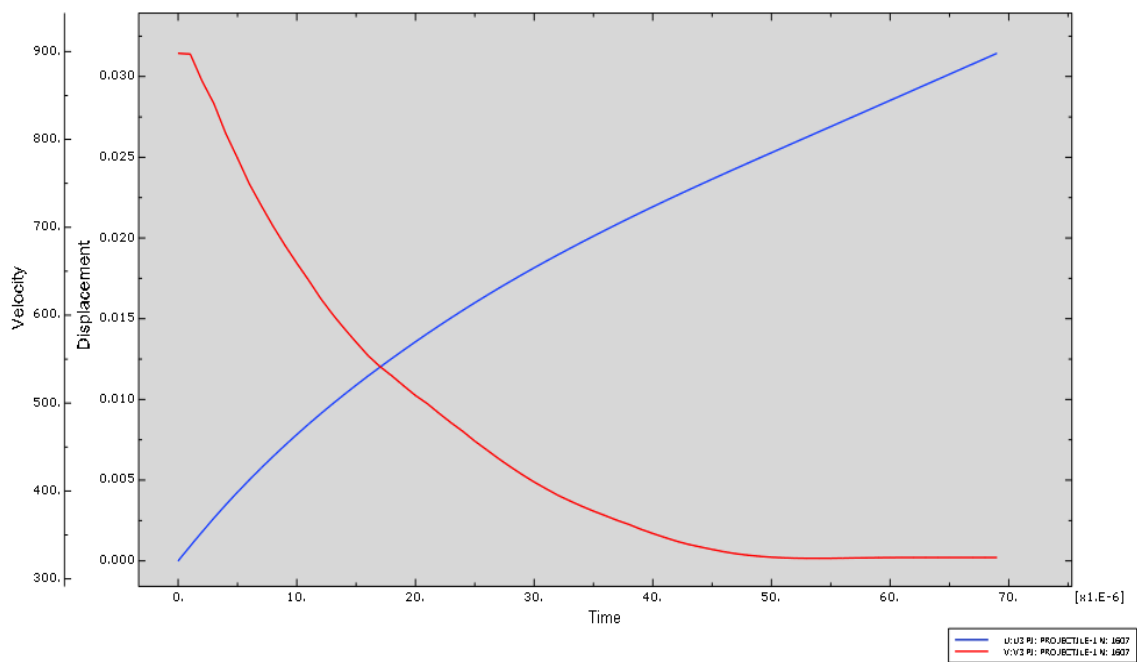


Figura 4.7 Velocidad del proyectil en función del tiempo y la distancia para el ensayo h898.

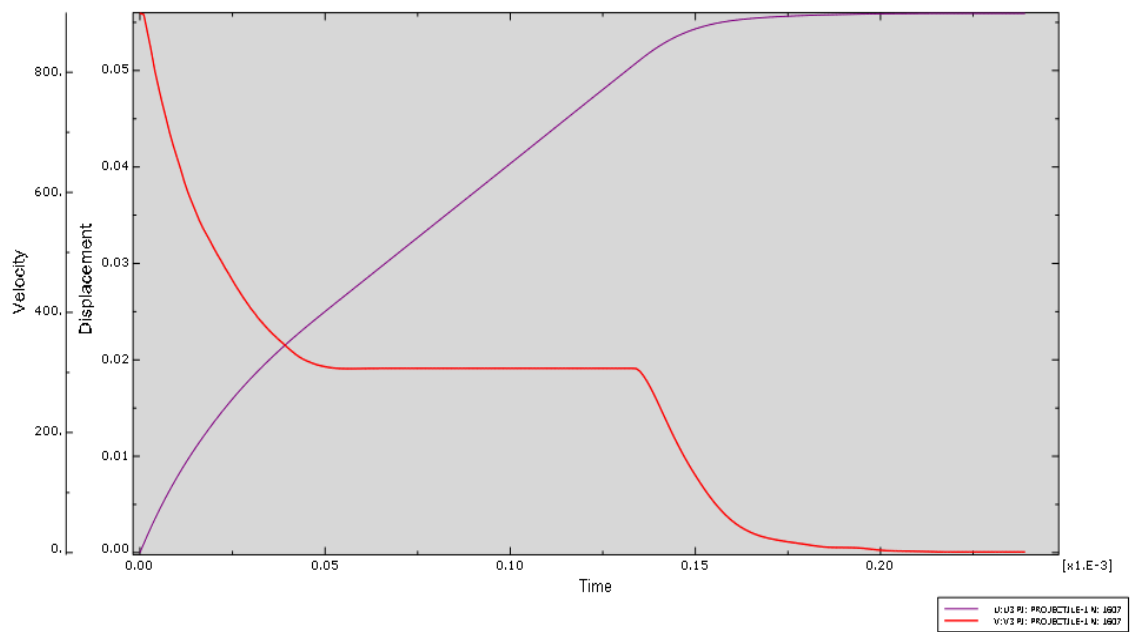


Figura 4.8 Velocidad del proyectil en función del tiempo y la distancia para el ensayo b898.

4.4 Energía cinética

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para la variación de energía cinética sufrida por el proyectil a lo largo del impacto. A continuación se muestran varias graficas en las que puede apreciarse la cantidad de energía cinética que absorbe cada objetivo en cada impacto. Haciendo un simple balance de energía se obtiene la variación de energía como $\Delta E = \frac{1}{2}m(v_i^2 - v_r^2)$; donde “m” es la masa del proyectil (13.4 gramos), y v_i y v_r la velocidad inicial y residual de cada impacto respectivamente. La ecuación de la energía cinética muestra la cantidad de energía que pierde el proyectil y que es la misma que absorbe la placa. En este análisis fueron despreciadas otras perdidas de energía como la de fricción en el contacto, o la de fricción con el fluido que rodea al proyectil.

La capacidad de absorción de energía de un objetivo está determinada por diversos factores como bien puede ser el espesor del mismo, el modo de fallo, o la energía del impacto del proyectil. Esta energía cinética es absorbida por el objetivo en forma de trabajo plástico. En la siguiente tabla 4.2 se muestran las diferentes energías absorbidas por los objetivos en los diferentes tipos de impacto. Evidentemente, en los ensayos en los que se incluye el doble casco del acorazado, la energía absorbida será notablemente mayor al contar con dos placas posicionadas en paralelo.

Tabla 4.2 Resultados obtenidos para la energía cinética absorbida en los distintos ensayos.

Ensayo	v_i (m/s)	v_{rh} (m/s)	v_{rb} (m/s)	$E_{c,1}$ (J)	$E_{c,2}$ (J)	$E_{c,T}$ (J)
h1128	1128	722,1	-	5031,41	-	5031,41
b1128	1128	721,8	373,1	5024,62	2558,25	7582,62
h898	898	314,3	-	4741,05	-	4741,05
b898	898	312,2	0	4749,86	653,04	5402,90

v_i – velocidad inicial del proyectil;

v_{rh} – velocidad residual del proyectil después del primer impacto;

v_{rb} – velocidad residual del proyectil después del segundo impacto;

$E_{c,1}$ – energía cinética absorbida en el primer impacto;

$E_{c,2}$ – energía cinética absorbida en el segundo impacto;

$E_{c,T}$ – energía cinética total absorbida.

A continuación, en las figuras 4.9 a 4.12, se muestran las gráficas de las energías de cada ensayo respecto del tiempo.

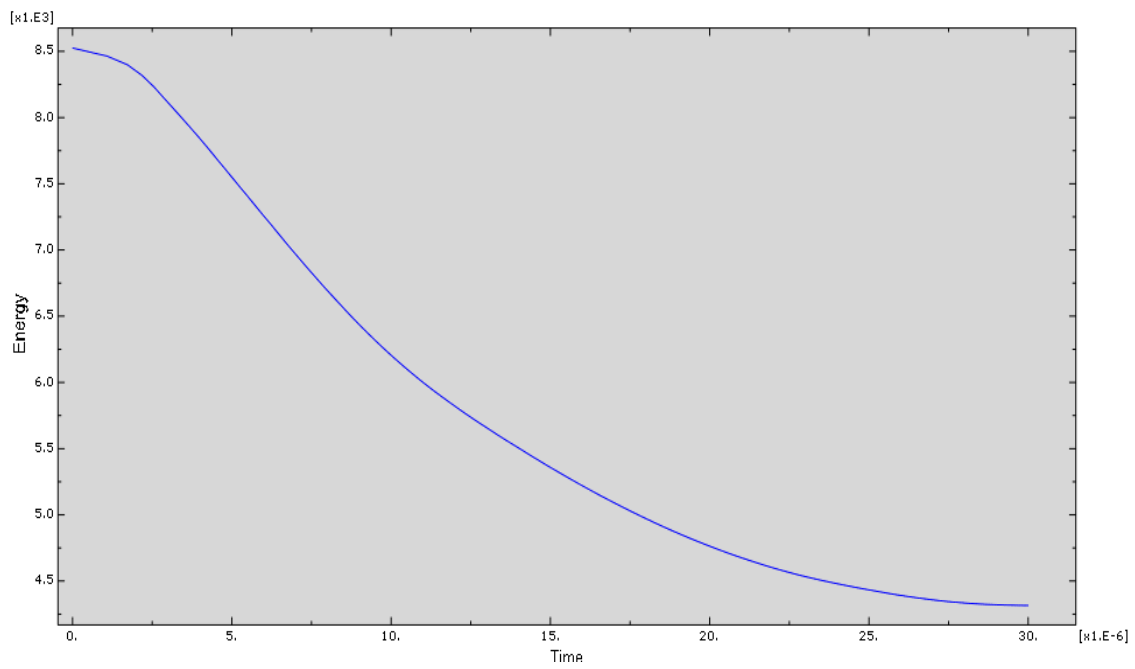


Figura 4.9 Variación de la energía del proyectil en el ensayo h1128.

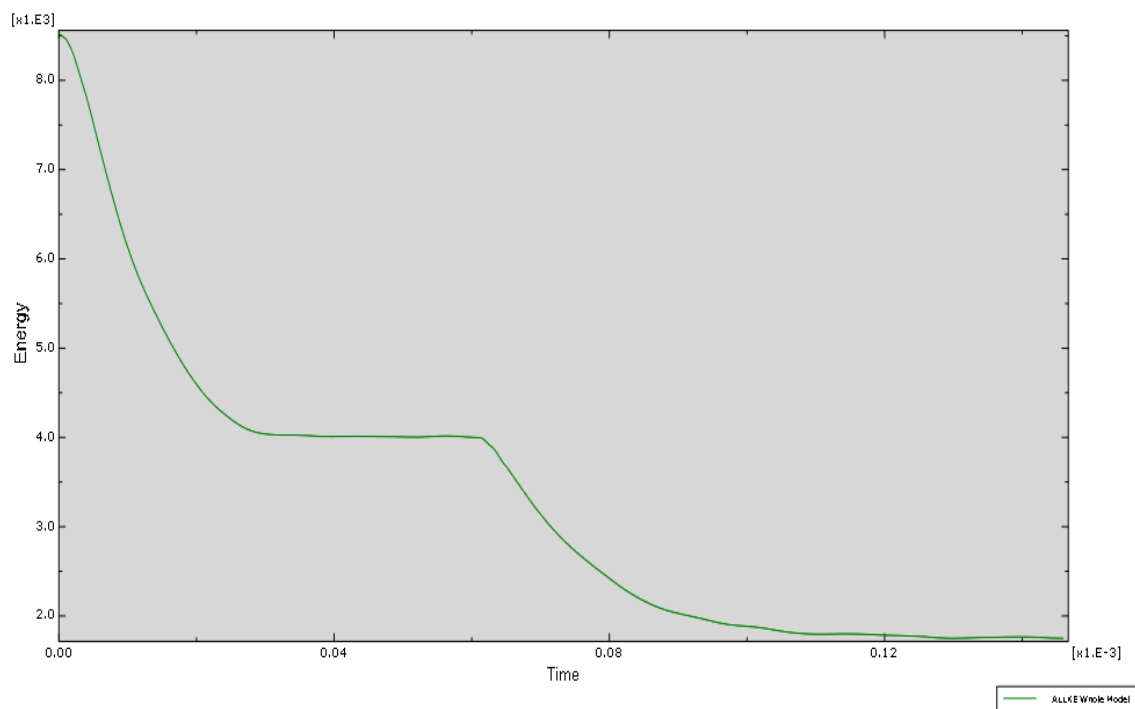


Figura 4.10 Variación de la energía del proyectil en el ensayo b1128.

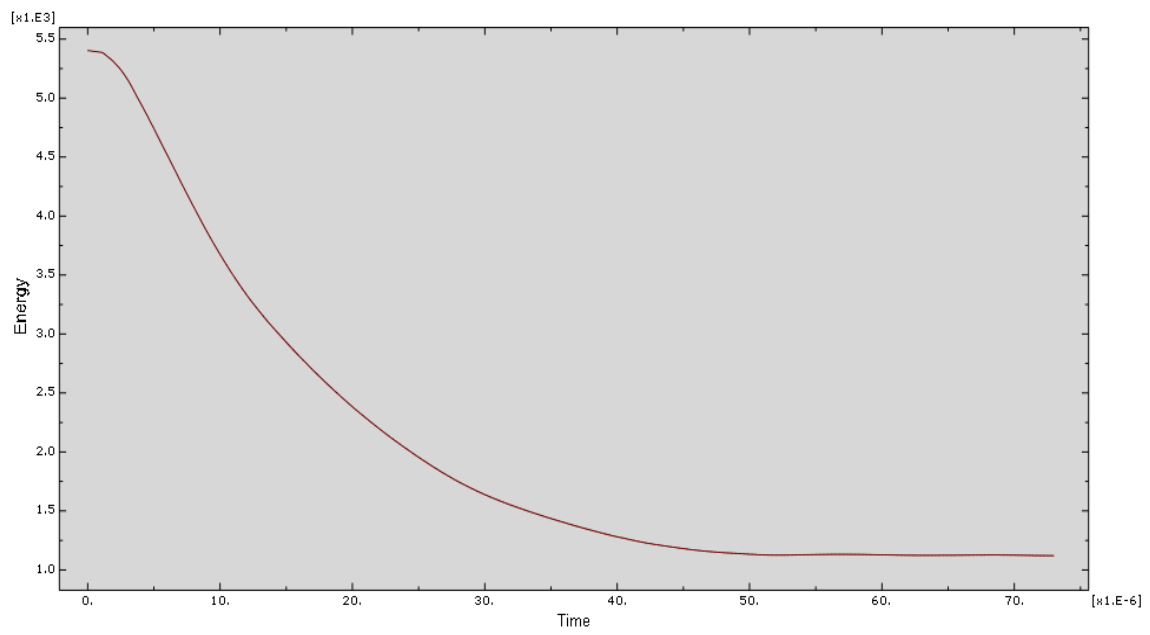


Figura 4.11 Variación de la energía del proyectil en el ensayo h898.

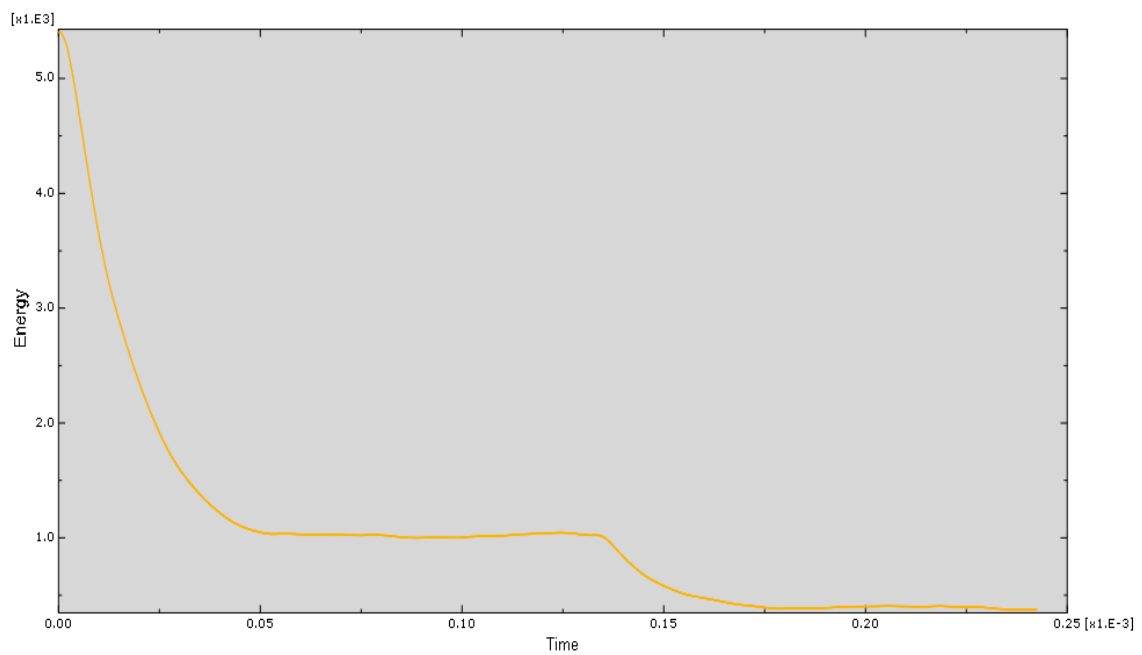


Figura 4.12 Variación de la energía del proyectil en el ensayo b898.

Como se puede observar, cuanto mayor es el espesor, mayor es la energía absorbida en el impacto debido a que mayor es la resistencia balística. Si comparásemos otro tipo de proyectil, obtendríamos mayor o menor pérdida de energía cinética dependiendo del ángulo que muestre la cabeza del mismo; para proyectiles más afilados como sería un proyectil con forma cónica, la energía cinética absorbida sería menor. En cambio, para un proyectil con una forma cilíndrica con punta plana, la energía cinética absorbida sería mayor.

4.5 Conclusiones obtenidas

4.5.1 Conclusiones generales

Gracias al estudio del arte realizado en este proyecto se han adquirido los conocimientos mínimos necesarios para la realización de un trabajo de este tipo. Después de estudiar numerosos modelos tanto analíticos, como experimentales o numéricos; el modelo de daño de Johnson-Cook fue el escogido para realizar la simulación mediante el software comercial Abaqus/Explicit.

Así se ha llevado a cabo la simulación del impacto de un proyectil esférico, el cual ha sido definido como un elemento rígido por simplicidad de cálculo, sobre un doble casco de un acorazado de 500 toneladas. El material seleccionado para el casco ha sido el acero Weldox 460 E dada su similitud con los aceros empleados en las aplicaciones offshore y navales. Se ha estudiado un rango de dos velocidades diferentes para así mostrar el caso en el que el proyectil consigue perforar el doble casco, y el caso contrario en el que el segundo casco consigue resistir el impacto.

Como puede observarse en el capítulo 4, al tratarse del mismo proyectil para todos los ensayos, el modo de fallo está completamente determinado por la velocidad de lanzamiento del proyectil. Para velocidades elevadas, el fallo ocurre mediante la formación de una garganta (*necking*), pudiendo arrancarse un tapón de material de espesor reducido (véase figura 4.1). Para velocidades bajas, próximas al límite balístico, el fallo sucede mediante la formación de pétalos, y no existe la formación de un tapón de material (véase figura 4.3).

Respecto a la velocidad residual del proyectil después de atravesar la placa, está totalmente influenciada por la velocidad inicial de lanzamiento, y el espesor de los cascos del acorazado. A mayor velocidad de lanzamiento, y menor espesor de la placa, mayor es la velocidad residual del proyectil después del impacto. También, en trabajos futuros podrá observarse como varía la velocidad residual dependiendo del material utilizado para el modelo.

Obsérvese que la energía cinética perdida en el impacto está condicionada directamente por el modelo de fallo, ya que esta es convertida en trabajo plástico durante el proceso de impacto entre el proyectil y la placa. Es decir, tendríamos un amplio rango de energías cinéticas convertidas a trabajo plástico dependiendo de la velocidad y de la forma del proyectil utilizado

en el ensayo, ya que estos son los factores que determinan el modo de fallo del material en mayor medida.

Finalmente como resultado de las simulaciones numéricas, puede observarse en la tabla 4.1. que el acorazado es capaz de resistir el impacto para el caso en el que el proyectil sea lanzado a 898 m/s o menos. Sin embargo, el casco del navío será inundado en el caso de que el proyectil impacte a 1128 m/s ya que perfora por completo el doble casco; además en este segundo caso el proyectil continua su trayectoria con una velocidad relativamente alta lo que supone un peligro para la seguridad.

4.5.2 Trabajos futuros

Para este trabajo fue estudiado el impacto de un proyectil esférico sobre el doble casco de un buque acorazado de 500 toneladas. Sin embargo, este método tiene innumerables aplicaciones que pueden realizarse en el futuro, a continuación se exponen algunas de las más importantes:

- Evolución del modelo para conseguir un mayor realismo en la simulación utilizando un proyectil de carácter deformable; y también utilizando mallas adaptativas.
- Generalización del ensayo modelizando un más amplio rango de velocidades, así como con diferentes tipos de proyectiles, y diferentes tipos de trayectorias (no perpendiculares al plano del impacto).
- Aplicación de este modelo a otros ámbitos de similares características como el campo de la automoción, o el de la aviación.
- Desarrollo de modelos analíticos que describan de forma rigurosa el comportamiento del impacto y con los que comparar posteriormente los resultados obtenidos en la simulación mediante el software.
- Evaluar este tipo de simulaciones empleando otro tipo de materiales, tanto metálicos como cerámicos o compuestos, y determinar así el grado de seguridad del sistema en función de su composición.
- Validar los resultados obtenidos de manera experimental garantizando así que se cumplen los resultados en condiciones ambientales reales.
- Ampliar los estudios balísticos a otro tipo de fluidos a parte del aire. Por ejemplo, el estudio del impacto de torpedos que se desplazan en el agua.

Referencias

- [1] W. Johnson. Impact Strength and Materials. Edward Arnold Publishers, 1972.
- [2] G.H. Jonas and J.A. Zukas. Mechanics of penetration analysis and experiment. USA Ballistic Research Laboratory, February 1979.
- [3] H. Zhao, Material behavior characterisation using SHPB techniques, test and simulations, Computers and Structures, 81, 1301-1310, 2003
- [4] Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, USA, [http : //www.swri.org/4org/d18/engdyn/engdynam](http://www.swri.org/4org/d18/engdyn/engdynam)
- [5] Wilkins, M.L., 1978. Mechanics of penetration and perforation. International Journal of Engineering Science 16, 793–807.
- [6] Baker, J., Williams, A., 1987. Hypervelocity penetration of plate targets by rod and rod-like projectiles. International Journal of Impact Engineering 5, 101–110.
- [7] Wilson, L.L., Foster, J.C., Foster, J.R., Jones, S.E., Gillis, P.P., 1989. Experimental rod impact results. International Journal of Impact Engineering 8 (1), 15–25.
- [8] Dikshit, S.N., Sundararajan, G., 1992. The penetration of thick steel plates by ogive shaped projectiles—experiment and analysis. International Journal of Impact Engineering 12 (3), 373–408.
- [9] Trucano, T.G., Grady, D.E., 1995. Impact shock and penetration fragmentation in porous media. International Journal of Impact Engineering 17, 861–872.
- [10] Piekutowski, A.J., Forrestal, M.J., Poormon, K.L., Warren, T.L., 1999. Penetration of 6061-T6511 aluminum targets by ogive-nose steel projectiles with striking velocities between 0.5 and 3.0 km/s. International Journal of Impact Engineering 23, 723–734.
- [11] Borvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Malo, K.A., 1999. Ballistic penetration of steel plates. International Journal of Impact Engineering 22, 855–886.
- [12] Yarin, A.L., Roisman, I.V., Weber, K., Hohler, V., 2000. Model for ballistic fragmentation and behindarmor debris. International Journal of Impact Engineering 24, 171–201.

- [13] Thomson, W.T., 1955. An approximate theory of armor penetration. *Journal of Applied Physics* 26 (1), 80–82.
- [14] Zaid, M., Paul, B., 1959. Oblique perforation of a thin plate by a truncated conical projectile. *Journal of the Franklin Institute* 268, 24–45.
- [15] Awerbuch, J., 1970. A mechanics approach to projectile penetration. *Israel Journal of Technology* 8 (4), 375–383.
- [16] Wilkins, M.L., 1978. Mechanics of penetration and perforation. *International Journal of Engineering Science* 16, 793–807.
- [17] Luk, V.K., Piekutowski, A.J., 1991. An analytical model on penetration of eroding long rods into metallic targets. *International Journal of Impact Engineering* 11 (3), 323–340.
- [18] A. Tate, A theory for the deceleration of long rods after impact, *J. Mech. Phys. Solids* 15, 387-399, 1967
- [19] B.A. Galanov, S.M. Ivanov, V.V. Kartuzov, On one new modification of Alekseevskii-Tate model for non-staionary penetration of long rods into targets, *Int. J. Impact Eng.*, 26, 201- 210, 2001
- [20] J.D. Walker, C.E. Anderson Jr, A time-dependent model for long-rod penetration, *Int. J. Impact Eng.* 16(1), 19-48, 1995.
- [21] M. Ravid, S.R. Bodner, Dynamic perforation of viscoplastic plates by rigid projectiles, *Int. J. Impact Eng.* 21(5), 587-603, 1983.
- [22] M. Ravid, S.R. Bodner, I. Holcman, Penetration into thick targets - refinement of a 2D dynamic plasticity approach, *Int. J. Impact Engng.* 15(4), 491-499, 1994.
- [23] L.M. Wilkins, M.W. Guinan, Impact of cylinders on a rigid boundary, *J. Appl. Phys.* 44(3), 1200-1206, 1973
- [24] MSC.Dytran 2002, Theory Manual
- [25] X. Quan, N. Birnbaum, SPH simulation of the ballistic perforation of GFRP, *Proc. Of 18th Int. Sympysium and exhibition on Ballistics*, San Antonio, Texas, 15-19 nov. 1999
- [26] Z. Rosenberg, E. Dekel, V. Hohler, A.J. Stilp and K. Weber, Hyperveloctiy penetration of tungsten alloy rods into ceramic tiles: Experiments and 2-D simulations, *Int. J. Impact Engng.*, 20, 675-683, 1997
- [27] D.J. Gee, Plate perforation by eroding rod projectiles, *Int. J. Impact Engng.* 28, 377-390, 2003
- [28] B.R. Sorensen, K.D. Kimsey, J.A. Zukas, K. Frank, Numerical analysis and modeling of jacketed rod penetration, *Int. J. Impact Engng.* 22, 71-91, 1999
- [29] C.E. Anderson Jr., R. Subramanian, J.D. Walker, M.J. Normandia, T.R. Sharron, Penetration mechanics of seg-tel penetrators, *Int. J. Impact Engng.* 20, 13-26, 1997

- [30] C.T. Lim, V.P.W. Shim, Y.H. Ng, Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor, *Int. J. Impact Engng*, 28, 13-31, 2003
- [31] H. Mahfyz, Y. Zhu, A. Hague, A. Abutalib, U. Vaidya, S. Jeelani, B. Gama, J. Gillespie and B. Fink, Investigation of high-velocity impact on integral armor using finite element method, *Int. J. Impact Engng*, 24, 203-217, 2000
- [32] Military Ballistic. A Basic Manual. Farrar & Leeming
- [33] Kaplan, Philip (2004). *Battleship*. Annapolis, Maryland: Naval Institute Press. p. 166.
- [34] Apuntes de Balística exterior. Francisco Cucharero
- [35] J.A. Zukas, T. Nicholas, T. Swift, L.B. Greszczuk, and D.R. Curran. *Impact dynamics*. John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [36] C.-C. Liang et al. / *Ocean Engineering* 30 (2003) 1137–116.
- [37] www.meneame.net
- [38] Historia de los acorazados contada por José I. Lago.
- [39] T. Borvik, O. S. Hopperstad, T. Berstad, and M. Lånegård. A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 20(5): 685-712, 2001.
- [40] Gordon R. Johnson and William H. Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1):31-48, 1985.
- [41] J.W. Hancock and A.C. Mackenzie. On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 24(2-3): 147-160, June 1976.
- [42] Zienkiewicz. *The Finite Element Method*. McGraw-Hill: New York, 1977.
- [43] Prácticas de Laboratorio de la Universidad Carlos III de Madrid. Introducción al Métodos de los Elementos Finitos (AbaqusTM).
- [44] Borvik, O. S. Hopperstad, T. Berstad, and M. Lånegård. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical, and conical noses: Part ii: numerical simulations. *International Journal of Impact Engineering*. 27(1):37-64, January 2002.